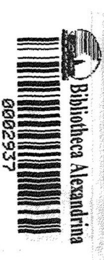
عاهد الخطيب

# مبادىء تحويل الطاقة



# مبادىء تحويل الطاقة

عاهد الخطيب

# مبادىء تحويل الطاقة

الناشر: دار الشروق للنشر والتوزيع
عمان - الأردن

* عاهد علي الخطيب، مبادىء تحويل الطاقة

* الطبعة الأولى ١٩٨٩م



* الناشر : دار الشروق للنشر والتوزيـع
ص. ب ٩٢٦٤٦٣ ــ هاتف ٦٢٤٣٢١
تلكس ٢٣٥٥٧ يونيتور
عمّان ــ الأردن

* التوزيع: المركز العربـي لتوزيـع المطبوعات
ص. ب ١٣/٥٦٨٧ ــ تلفون ٨٠٣٥٣٧
تلكس ٢٠٩٨٣ آسيب
بيروت ــ لبنان

# المقدّمـة

## بسم الله الرحمن الرحيم

يأتي هذا الجهد المتواضـع في إطار محاولة لإيجاد مراجـع باللغة العربية لطَلَبة الجامعات وكليّات المجتمـع والمعاهد في الدول العربية والتي تفتقـر إلى مثل هـذه المراجـع في مختلف المواضيـع العلمية .

روعي في إعـداد مادة هـذا الكتاب البسـاطة والـوضوح مـع التـركيـز على المبـادىء الأساسيـة لتحويـل الطاقـة ، ولزيـادة الإيضاح حُـرص على حل بعض الأمثلة المساعدة حيثما لزم ذلك .

وقـد افترض تـوافُر خلفيـة علمية لـدى الدارس لهـذا الكتاب في مـواضيـع الديناميكا الحرارية وتوليد البخار ومحركات الاحتراق الداخلي ومبـادىء الهندسـة الكهربائية لكي يتمكن من متابعة موضوع هذا الكتاب وتحقيق الفائدة المرجوّة .

صُنِّفَت مـادة هذا الكتـاب في ثمانيـة فصول ، تنـاول الفصل الأول حـاجـة الإنسان المتنامية للطاقـة وأثر الطـاقة في تطـور المدنيـة الإنسانيـة منذ القـدم ، ومصادر الطاقـة المختلفة من مصـادر تقليديـة غير متجـددة كوقـود المستحاثـات ومصادر متجددة كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة المدّ والجزر .

تعرَّض الفصل الثاني لمبادىء تحويل الطـاقة والقـوانين التي تحكم عمليات التحويل خصوصاً القـانونين الأول والثـاني في الديناميكا الحـرارية مـع مقـارنة الكفاءات النظرية والعملية لعمليات تحويل الطاقة المختلفة .

تعرَّض الفصل الثالث للطرق المختلفة المستخدمة في إنتاج الطاقة الحرارية مـع التـركيز على أهميـة الاحتراق ــ ووقـود هذا الاحتـراق ــ في هذا المجـال ، واختتم الفصـل باستعـراض وافٍ للحسابـات الشمسية المختلفـة وأهمية الطـاقـة الشمسية كمصدر رئيـس من مصادر الطاقة الحرارية والتطبيقات العملية المختلفة للطاقة الحرارية من الشمس .

تعرَّض الفصل الرابع للأنظمة المختلفة المستخدمة في إنتاج الطاقة الميكانيكية من الطاقة الحرارية كمحركات دورة رانكن ـ خصوصاً التوربينات البخارية ـ والمحركات العاملة على الغاز ـ محرك ستيرلنغ والتوربين الغازي ـ وإنتاج الطاقة الميكانيكية من الطاقة الكيميائية كمحرك الاحتراق الداخلي ومضخة همفري ، وأخيراً إنتاج الطاقة الميكانيكية من الطاقة المائية باستخدام التوربينات المائية المختلفة .

استعرض الفصل الخامس أكثر الطرق شيوعاً في إنتاج الطاقة الكهربائية بشكل مباشر كالتوليد الكيميائي والتوليد الكهروضوئي والتوليد باستخدام طاقة الرياح .

تحدَّث الفصل السادس عن الطرق الرئيسة المتَّبعة في تخزين الطاقة بأشكالها المختلفة وأهمية هذا التخزين في التطبيقات العملية .

خُصِّص الفصل السابع للحديث عن أهمية وفوائد ترشيد استهلاك الطاقة والسبل المختلفة التي يمكن اتباعها لترشيد هذا الاستهلاك في مختلف قطاعات الاستهلاك على المستويين الفردي والجماعي أو الحكومي .

أما الفصل الثامن والأخير فقد استعرض التلوُّث البيئي الناتج عن عمليات تحويل الطاقة وأهم الطرق والأجهزة المستخدمة للتخفيف من حدَّة هذا التلوث .

في النهاية آمل أن أكون قد وُفِّقْت في توفير مادة مفيدة لمدرّسينا وطَلَبتنا الأعزاء راجياً من الله العون والتوفيق .

**المؤلف**
١٨ شباط ١٩٨٩م
١١ رجب ١٤٠٩هـ

# المحتويات

| الموضوع | الصفحة |
| --- | --- |



## الفصل الثالث : إنتاج الطاقة الحرارية :

| الموضوع | الصفحة |
|---|---|

## الفصل الرابع : إنتاج الطاقة الميكانيكية :



## الفصل الخامس : إنتاج الطاقة الكهربائية :



## الفصل السادس : تخزين الطاقة :

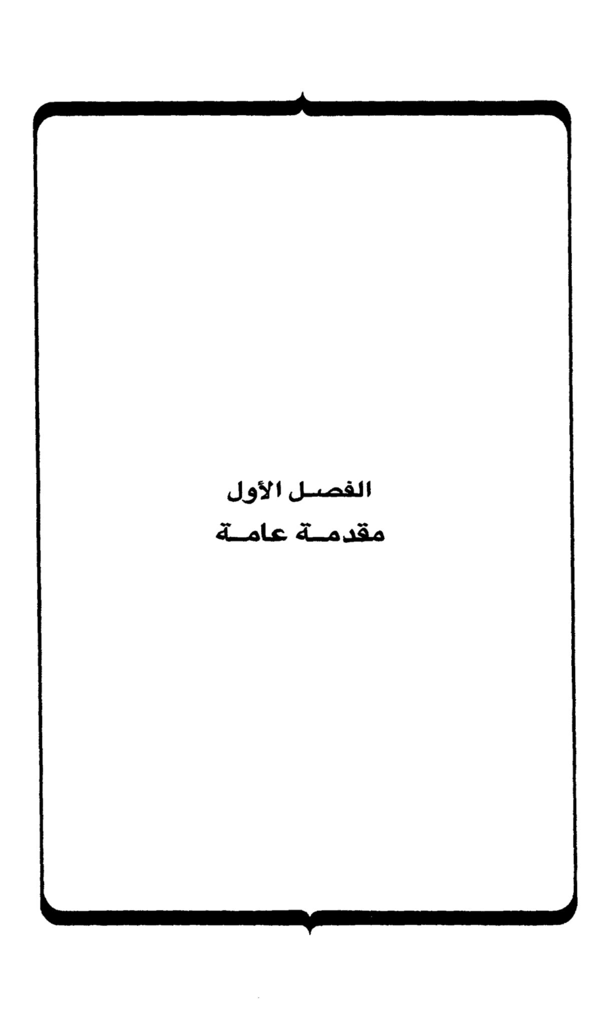


## الفصل السابع : ترشيد استهلاك الطاقة :

## الفصل الثامن: التلوث البيئي الناتج عن تحويل الطاقة:







# الفصــل الأول

# مقدمــة عامــة

# ١ ـ ١
# التطور التاريخي لاستخدام الطاقة

تعتبر الطاقة إحدى المفاهيم المألوفة والشائعة الاستعمال في الحياة اليومية . ويمكن وصف الطاقة بعدة طرق ولكن أياً من هذه الطرق لا يعطي تعريفاً متكاملاً للطاقة . فالطاقة هي الحرارة والضوء والكهرباء والقابلية لإنجاز شغل مفيد .

والحياة على هذه الأرض غير ممكنة من دون الطاقة لأن الطاقة هي التي تُنمي النباتات التي تمثل المصدر الأساسي للغذاء لجميع الكائنات الحية. والطاقة هي التي تجعل الإنسان قادراً على الحركة وتشغل جميع الوسائل التي يستخدمها في تنقلاته .

استعمل الإنسان البدائي عضلاته فقط لتحويل الطاقة إلى شغل مفيد . وفي بداية التاريخ الإنساني توافر للإنسان مصدران أساسيان للطاقة هما طاقة الشمس الإشعاعية والطعام الذي يتناوله . وعندما اكتشف الإنسان النار كانت تلك أسرع وسيلة استخدمها لتحويل الطاقة الكيميائية المختزنة في أخشاب الأشجار إلى طاقة حرارية . وبعد ذلك اكتشف الإنسان مصادر أخرى للطاقة الكيميائية ( الوقود ) مثل الغاز الطبيعي والفحم الحجري والنفط .

إن الطاقة الكيميائية المختزنة في الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي والتي تعدّ المصادر الرئيسة للطاقة في وقتنا الحاضر هي في الأصل طاقة شمسية. ذلك لأن الطاقة الشمسية اختُزنت في النباتات ( بواسطة عملية التمثيل الضوئي ) ومن ثم في الكائنات الحية التي تتغذى على هذه النباتات خلال فترات نموها .

وقد تحولت هذه الكائنات من نباتات وحيوانات إلى فحم حجري ونفط في

باطن الأرض عبر العصور السحيقة بفعل الضغوط ودرجات الحرارة المرتفعة كما يرى أغلب المختصين في هذا المجال .

اكتشف الفحم الحجري في القرن الثامن عشر وتم فيما بعد استخراج غاز من هذا الفحم استعمل للإضاءة ، ثم تمكن الإنسان بعد ذلك من تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية عند اكتشافه للآلة البخارية ، وكانت أول مضخة حرارية استعمل الخشب كوقود لها هي تلك التي اخترعها الإنجليزي توماس سافري عام ١٦٩٨م . وفي عام ١٧٩١م اخترع الإيطالي ساندرو فولتا المركم الرصاصي الكهربائي الذي يقوم بتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية . وبعد ذلك بحوالى قرن تم تطوير كل من المحرك الكهربائي والمولد الكهربائي ( الدينامو ) حيث أصبح بالإمكان بواسطتهما تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية وبالعكس .

حُفر أول بئر للنفط في العالم في ولاية بنسلفانيا الأميركية عام ١٨٥٩م ، وفي عام ١٨٦٠م قام مهندس فرنسي يدعى جين جوزيف ببناء أول محرك احتراق داخلي وكان هذا المحرك ذا فعالية منخفضة ، وفي عام ١٨٧٦م اخترع الألماني نيكولاس أوتو محرك الاحتراق الداخلي ذي الأشواط الأربعة ، ثم قام عالم ألماني آخر بعد ذلك باختراع المكربن ( المغذي Carbureter ) ،ثم قام عالم ألماني ثالث بتصميم أول محرك سيارة يعمل بالبنزين . ومنذ ذلك الحين أخذت صناعة السيارات تتطور بسرعة وأصبح النفط مصدراً هاماً للطاقة كالفحم الحجري ، وتعددت استعمالاته في الميادين كافة ، فقد استخدمت مركبات الوقود الزيتي الخفيفة في مجال التدفئة المركزية، كما استخدمت مركباته الثقيلة في تشغيل محركات السفن في حين استخدم زيت الديزل في المركبات الأرضية الثقيلة والقطارات وفي إنتاج الكهرباء في محطات التوليد .

استخدم البنزين كمصدر للطاقة في الجيل الأول من محركات الطائرات ثم استخدم الكيروسين ( الكاز ) في وقت لاحق في محركات الطائرات النفاثة الحديثة .

خلال التنقيب عن النفط ، اكتشف المهندسون مصدراً هاماً آخر من مصادر الطاقة الكيميائية هو الغاز الطبيعي المكون من الميثان ( methane ) بشكل رئيس .

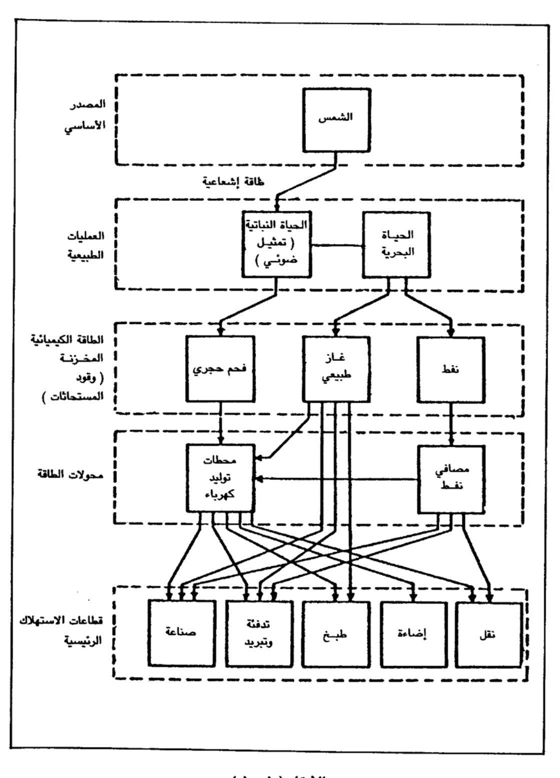
وقد استخدم هذا الغاز بشكل واسـع في الصناعة وتدفئة المنازل وتبريدهـا وتم إيصاله للبيوت بواسطة أنابيب أو بتعبئته كسائل في اسطوانات مضغوطة وذلك لاستخدامه في إنتاج الطاقة الحرارية .

كما رأينا فإن الشمس هي المصدر الأساسي للطاقة على هذه الأرض. ويمكن تمثيل انسياب الطاقة من الشمس إلى محطات الاستهلاك الرئيسة للطاقة بـواسطة المخطط في الشكل ( ١ ـ ١ ) .

اعتمد تقدم وتطور الحضارة البشـرية عبـر حقب التاريـخ المختلفـة إلى حد بعيد على تطور مقدرة الإنسان على تسخير الطاقة من مصادرها المختلفة لمـواجهة المتطلبات المواكبة لهذا التطور . يبين الجدول ( ١ ـ ١ ) العلاقة الوثيقة بين تقـدم المجتمعات البشرية في ضوء تطور استهلاكها من الطاقة عبر حقب التاريـخ .

| الـــدور | كيلوغرام فحم حجري مكافىء في الـيــوم |
|---|---|
| المجتمـع البدائي | ٠,٣ |
| المجتمـع الاقطاعي | ٠,٧ |
| المجتمـع الزراعي البدائي | ١,٨ |
| المجتمـع الزراعي المتطور | ٣,٨ |
| المجتمـع الصناعي | ١١,٢ |
| المجتمـع المتطور تكنولوجياً | ٣٣,٣ |

الجدول ( ١ ـ ١ )
تقديرات الاستهلاك الفردي للطاقة في الأدوار التاريخية المختلفة




**الشكل ( ١ ـ ١ )**
**انسياب الطاقة من الشمس**
**إلى قطاعات الاستهلاك الرئيسة**

# ١ ـ ٢
## معدلات النمو في استهلاك الطاقة

عندما تتزايد قيمة كمية ـــ كالقدرة مثلاً ـــ بمعدل ثابت i في كل عـام ، يمكن إيجاد تغير هذه القيمة الكمية الزمني من المعادلة الآتية :

$$\frac{dp}{dt} = pi \qquad (١ - ١)$$

وإذا افترضنا أن القدرة الابتدائية هي ( P0 ) عنـد زمـن اختيـاري ( t = 0 ) ، يمكن إجراء تكامل لطرفي المعادلة ( ١ ـ ١ ) :

$$\int_{p_0}^{p} \frac{dp'}{p'} = Ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = \int_{0}^{t} i\,dt = it \qquad (٢ - ١)$$

وبذلك تكون :

$$P = p_0\, e^{it} \qquad (٣ - ١)$$

يمثـل الـرمـز (e) أسـاس اللـوغـاريتمـات الطبيـعيـة الـذي يسـاوي (2.7182818...) .

لنفترض أن ( td ) هو زمن المضاعفة ( doubling time ) أي الزمن اللازم لتصبـح القدرة المستهلكة ضعف القـدرة الابتدائيـة فيمكن إيجاد هـذا الزمن من

المعـادلـة ( ١ ـ ٣ ) وذلـك بتعـويض ( $P = 2p_0$ ) و ( $td = t$ ) في المعـادلـة ( ١ ـ ٣ )

$$2p_0 = p_0 e^{itd}$$

بقسمة طرفي المعادلة على ( $p_0$ ) وأخذ اللوغاريتم الطبيعي لطرفي المعادلة

$$Ln (2) = Ln ( e^{itd} ) \Rightarrow Ln (2) = itd$$

$$td = Ln (2) / i = 0.0693 / i \qquad (١ ـ ٤)$$

وكمثـال تطبيقي على المعـادلـة ( ١ ـ ٤ ) ليكن معـدل النمـو في استهـلاك القدرة الكهربائية في بلد ما هو ٧ ٪ في العام فإن زمن المضاعفة ( td )

$$td = 0.0693 / 0.07 = 9.9 \text{ years}$$

يمكن إيجاد الطاقة المستهلكة خلال فترة زمنية معينة بإجراء تكامل للمعادلة ( ١ ـ ٣ ) خلال تلك الفترة الزمنية. وإذا أردنا إيجاد الطاقة المستهلكة خـلال فترة زمنيـة سـابقـة وطـويلـة جـداً فـإنـه أمـر طبيعي أن نفتـرض أن زمن البـدايـة هو ( $t = -\infty$ )

فتكـون الطاقـة الكلية المستهلكـة ( $E_0$ ) من الـزمن ( $t = -\infty$ ) إلى زمن اختياري ( $t = t_1$ ) هي :

$$E_0 = \int_{-\infty}^{t_1} p_0 e^{it} dt = \frac{P_0}{i} e^{it} \Big|_{-\infty}^{t_1}$$

$$= \frac{P_0}{i} e^{it_1} - \frac{P_0}{i} e^{i(-\infty)} = \frac{P_0}{i} e^{it_1} - 0$$

$$E_0 = \frac{P_0}{i} e^{it_1} \qquad (١ ـ ٥)$$

وتكون الطاقة المستهلكة فترة زمنية من ( $t = t_1$ ) إلى ( $t = t_2$ ) هي :

$$E_1 = \int_{t_1}^{t_2} p_0 e^{it} dt = \frac{P_0}{i} ( e^{it_2} - e^{it_1} )$$

$$= \frac{P_0}{i} e^{it1} ( e^{i[ t_2 - t_1 ]} - 1 )$$

$$E_1 = E_0 ( e^{i[ t_2 - t_1 ]} - 1 ) \qquad (١ - ٦)$$

إذا عوضنا ( $td = t_2 - t_1$ ) في المعادلة ( ١ - ٦ ) نحصل على النتيجة ( $E = E_0$ )

وهذا يعني أن الطاقة المستهلكة خلال زمن المضاعفة ( td ) أو فترة التضاعف تساوي الطاقة الكلية المستهلكة خلال الزمن السابق لهذه الفترة .

**مثال ١ - ١ :**

إذا علمت أن استهلاك الأردن من النفط عام ١٩٨١م هو ١,٨١ مليون طن، ما هو مقدار الاستهلاك المتوقع من النفط عام ١٩٩٠م بفرض أن معدل النمو في الاستهلاك خلال هذه الفترة يبقى ثابتاً ويساوي ٩,٥ ٪ في العام؟ وما هو الزمن اللازم لكي يتضاعف استهلاك الأردن من النفط إذا بقي معدل النمو في الاستهلاك ثابتاً خلال فترة التضاعف ؟

نفرض أن (P) هو استهلاك الأردن من النفط في سنة معينة

$P_{90} = P_{81} e^{it}$

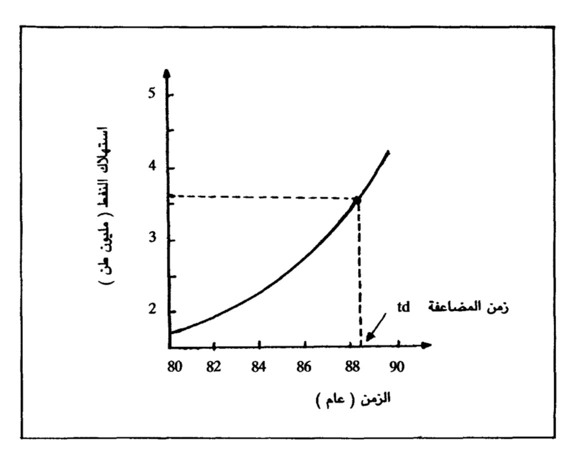
$t = 1990 - 1981 = 9$ years

$P_{90} = 1.81 e^{( 0.095 ) (9)} = 4.26$ ( million ton / year )

ويكون زمن المضاعفة ( td )

$td = 0.693 / i = 0.693 / 0.095 = 7.3$ years

يبين الشكل ( ١ ـ ٢ ) منحنى تزايد ( نمو ) استهـلاك النفط في الأردن في الفترة الواقعة بين عامي ( ١٩٨٠ ــ ١٩٩٠م ) بالاعتماد على القيم المحسوبة في مثال ١ ـ ١ ، وكما نلاحظ من الرسم فإن الاستهلاك يتضاعف عـمـا كان عليه عام ١٩٨١م وذلك في عام ١٩٨٨م تقريباً .




**الشكل ( ١ ـ ٢ )**
**نمو استهلاك النفط في الأردن**

**مثـــال ١ ـ ٢ :**

قُـدر استـهـلاك الأردن مـن الطـاقـة عـام ١٩٨٢م بحـوالـى ٢,٢ × ١٠^١٦ جول. احسب مقدار ما كان عليه هذا الاستهلاك عام ١٩٧١م ، وإذا علمت أن معدل النمو في الاستهلاك خلال الفترة الزمنية بين عامي ( ٧١ ــ ٨٢م ) هو ١٢,٨ ٪ في العام، احسب مقدار الاستهلاك المتوقـع عام ١٩٩٠م . وبفرض أن

معدل النمو في الاستهلاك خلال الفترة الزمنية ( ٨٢ ــ ٩٠م ) ثابت ومقـداره ٨ ٪ في العام . ما هـو الـزمن الـلازم ليصبـح الاستهـلاك ضعف مـا كـان عليـه عـام ١٩٨٢م ، ثم احسب الطاقة التي استهلكها الأردن في الفترة ( ٧١ ــ ٨٢م ) .

$P_{82} = P_{71}\, e^{it}$

$t = 1982 - 1971 = 11$ years

استهلاك الأردن من الطاقة عام ١٩٧١م

$2.2 \times 10^{16} = P_{71}\, e^{(0.138)(11)}$

$P_{71} = 2.2 \times 10^{16} / e^{1.518} = 4.82 \times 10^{15}$ J / year

أي أن الاستهلاك عام ٨١م زاد عنه عام ٧١م بمقدار

$2.2 \times 10^{16} / 4.82 \times 10^{15} = 4.56$ times

الاستهلاك عام ٩٠م

$P_{90} = P_{82}\, e^{(0.08)(90 - 82)}$

$= 2.2 \times 10^{16}\, e^{0.64} = 4.17 \times 10^{16}$ J

زمن المضاعفة ( td )

$td = 0.693 / i = 0.693 / 0.08 = 8.7$ years

يتضاعف الاستهلاك عـمـا كان عليه عام ٨٢م في عام

$1982 + 8.7 \simeq 1991$

مجموع الطاقة الكلية المستهلكة قبل عام ٧١م

$$E_{(71 - 82)} = \frac{P_0}{i}\, e^{it_1} \left( e^{i[t_2 - t_1]} - 1 \right)$$

$P_0 = P_{71} = 4.82 \times 10^{15}$ J / year

$t_1 = 0 \rightarrow t_2 = 82 - 71 = 11$ years

$$E_{(71-82)} = \frac{4.82 \times 10^{15}}{0.138} [ e^{(0.138)(11)} - 1 ] = 1.81 \times 10^{16} \text{ J}$$

**مثـــال ١ ـ ٣ :**

قُدر الاحتياطي العالمي من طاقة الفحم الحجري والنفط والغـاز الطبيعي عام ١٩٧٠م بحوالى ٢,٢ × ١٠^٢٣ جول. إذا علمت أن استهلاك العالم من الطـاقة عـام ١٩٧٠م هو ٢,٠٤٥ × ١٠^٢٠ جول فمـا هي الفترة الـزمنية الـلازمة لاستنفـاد هذا الاحتيـاطي بفرض أن معـدل النمو في الاستهـلاك للعالم من الطـاقـة يبقى ثـابتـاً ويساوي ٥ ٪ في العام؟

$$P_0 = P_{70} = 2.045 \times 10^{20} \text{ J / year}, \ i = 0.05$$

نفرض أن عام ٧١ يقابل زمن اختيار هو $t_1 = 0$

$$E_1 = E_{70} = 2.2 \times 10^{23} \text{ J}$$

$$E_1 = \frac{P_0}{i} e^{it1} ( e^{i[t_2 - t_1]} - 1 )$$

$$2.2 \times 10^{23} = \frac{2.045 \times 10^{20}}{0.05} e^{(0)} [ e^{(0.05)(t_2 - 0)} - 1 ]$$

$$2.2 \times 10^{23} = \frac{2.045 \times 10^{20}}{0.05} [ e^{0.05t_2} - 1 ]$$

$$e^{0.05t_2} - 1 = 53.79$$

$$e^{0.05t_2} = 54.79$$

$$0.05t_2 = \text{Ln} ( 54.79 ) = 4$$

$$t_2 = 4 / 0.05 = 80 \text{ years}$$

أي أن الاحتياطي العالمي من هذه المصادر الثلاثة سوف ينفد في عام

$1970 + 80 = 2050$

**ملاحظة :** تُعدّ هذه المصادر من نفط وفحم حجري وغـاز المصادر الـرئيسة للطاقة في العالم وتشكل أكثر من ٩٠ ٪ من مجموع الطاقة المستهلكة .

**مـثـال ١ ـ ٤ :**

كان استهلاك الأردن من النفط عـام ١٩٨٣م يساوي ٢,٤ مليـون طن والذي هو أعلى بمقدار ٢ ٪ من استهلاك عام ١٩٨٢م . إذا كان الاكتشاف الحديث للنفط في الأردن ، يمكن أن ينتـج مـا مقداره ٤٠٠ بـرميـل ( barrel ) في اليـوم ( طن النفط يساوي ٧ براميل تقريباً ) :

١ ــ في أي عـام كانت كميـة النفط المكتشفة ، يمكن أن تفي بـاحتياجـات الأردن من النفط بافتراض أن معدل النمو المذكور كان ثابتاً ؟

٢ ــ إذا كانت منطقة النفط المكتشف بحـاجة إلى خمس سنـوات ( ابتداءً من عام ١٩٨٣م ) للتطوير وحفر المـزيد من الآبـار ، فما مقـدار الإنتاج المطلـوب ــ في نهاية هذه الفترة ــ لسدّ احتياجات الأردن من النفط ؟

٣ ــ إذا لم يتم اكتشاف المزيـد من النفط ــ غير الكميـة المكتشفة والتي تساوي ٤٠٠ برميل في اليوم ــ ، فكم تكفي هذه الكمية محطة الحسين الحراريـة في الزرقاء إذا كانت قدرة هذه المحطة تساوي ٣٦٥ ميجاواط ( القـدرة القصوى ) إذا علمت أن الكفـاءة الحراريـة للمحطة هي ٣٥ ٪ والقيمـة الحراريـة العليا للنفط الخام ( H H V ) هي ٤٢١٠٠ كيلوجول / كغم .

١ ــ في عام ١٩٨٣م كان الاستهلاك يساوي $( 2.4 \times 10^6 \text{ ton / year} )$

معـدل النمـو $i = 0.02$

الاستهلاك السنوي $\frac{400}{7} \times 365 = 20857.14 \text{ ton / year}$

كان هذا الاستهلاك كافٍ في عام

$P = p_0 e^{it}$

$P_{83} = p_0 \, e^{it}$

$2.4 \times 10^6 = 20857.14 \, e^{0.02\,t}$

$t = 237.3$ years

$year = 1983 - 237.3 \simeq 1746$

٢ ـ

$P_{88} = P_{83} \, e^{it}$

$P_{88} = 2.4 \times 10^6 \, e^{0.02 \times 5} = 2.65 \times 10^6$ ton / year

٣ ـ القدرة الحرارية = القدرة الكهربائية / الكفاءة الحرارية

$P_{th} = 365 \times 10^3$ KW / 0.35 = $10.429 \times 10^5$ KW

الطاقة الحرارية المستهلكة في اليوم

$$Eth / day = 10.429 \times 10^5 \frac{KJ}{s} \times 24 \times 3600\ S = 9.01 \times 10^6\ KJ$$

كتلة الوقود اللازمة في اليوم

$$Fuel / day = 9.01 \times 10^{10}\ KJ / 42100\ kg = 2.14 \times 10^6\ kg$$

$$1\ barrel = \frac{1000}{7} = 142.86\ kg$$

كتلة الوقود المتوافرة في اليوم

$$Fuel\ available / day = 142.86 \times 400 = 57144\ kg$$

زمن تشغيل المحطة باستخدام كمية الوقود المتوافرة

$$Time = \frac{57144\ kg}{2.14 \times 10^6\ kg\ / day} = 0.0267\ day$$

$$Time = 0.0267\ day \times \frac{24\ hr}{day} \times \frac{60\ min}{hr} = 38.45\ minutes$$

# ١ ـ ٣

# زيادة الطلب على الطاقة
# تأثير التزايد السكاني والتطور التكنولوجي

يحتاج الإنسان إلى الطاقة لتسيير جميع مناحي حياته اليومية، فالطاقة ضرورية لطبخ الطعام وإنارة البيوت والشوارع وتشغيل جميع الأجهزة الكهربائية المستخدمة في البيوت لتحقيق الراحة للإنسان. والطاقة ضرورية أيضاً في النقل بمختلف أنواعه وفي الصناعة . وفي مجال الزراعة تحول الإنسان من الاعتماد على الحيوانات إلى الاعتماد ــ بشكل متزايد ـ على الآلات الزراعية المختلفة التي تستخدم بعض مشتقات النفط كوقود لها خصوصاً زيت الديزل .

في المناطق الحضرية ( Urban ) خصوصاً ، فإن قطاعات كبيرة من السكان تستهلك كميات متزايدة من الطاقة لتوفير ظروف معيشة أكثر راحة ورفاهية في البيوت .

ولا يزال الطلب على الطاقة يزداد يوماً بعد يوم ، ويمكن إرجاع ذلك لسببين رئيسين هما : (١) الزيادة المضطردة في عدد السكان (٢) ازدياد استهلاك الفرد للطاقة باستمرار بسبب زيادة التقدم التكنولوجي وتطور وسائل الترفيه والراحة .

يتزايد مقدار السكان في العالم بمعدل ٢ ٪ تقريباً في كل عام، في حين أن معدل استهلاك الطاقة العالمي يزداد بمعدل يصل إلى ٥ ٪ أو أكثر في كل عام وذلك تبعاً للأرقام المتوافرة بين عامي ١٩٦٠م و١٩٧٨م. ويبين الجدول ( ١ ـ ١) التطور في استهلاك مصادر الطاقة الأولية في الفترة الزمنية الواقعة بين عامي ( ١٩٦٠ ــ ١٩٧٨م ) .

| مصادر الطاقة | ١٩٦٠م (مليون طن) | ٪ | ١٩٧٨م (مليون طن) | ٪ | معدل النمو السنوي المركب (٦٠ ـــ ٧٨) |
|---|---|---|---|---|---|
| الوقود الصلب | ٣٣٠٦ | ٥٢ | ٣٨٠٣ | ٣٢ | ١,٣ |
| الوقود السائل | ١٣٦٢ | ٣٢ | ٣٩٥٩ | ٤٥ | ٦,١ |
| الغاز الطبيعي | ٥٩٣ | ١٤ | ١٧٣٧ | ٢٠ | ٦,٣ |
| الكهرباء(كهرومائية+ذرية) | ٨٥ | ٢ | ٢٥٦ | ٣ | ٦,٣ |
| المجموع | ٤٣٤٦ | ١٠٠ | ٨٧٥٥ | ١٠٠ | ٤,١ |

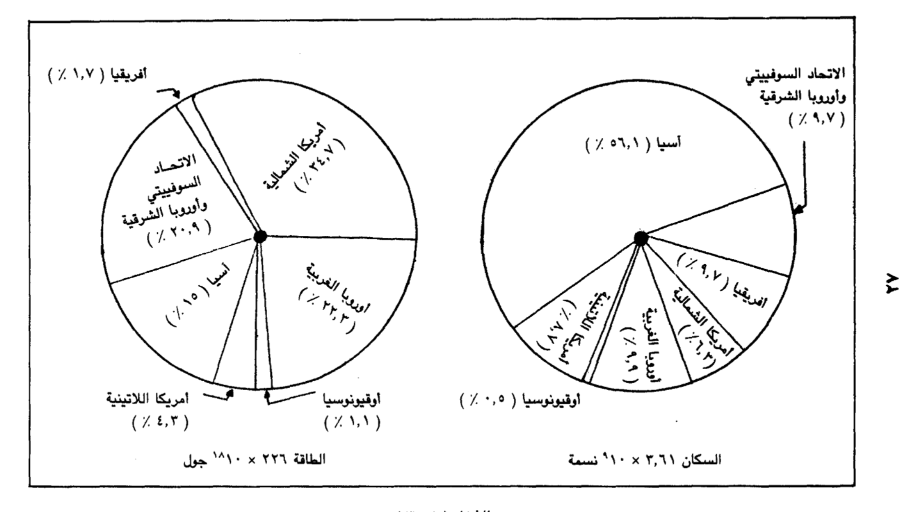
**الجدول ( ١ ـ ١)**
**تطور استهلاك المصادر الأولية للطاقة بين عامي (١٩٦٠ ـــ ١٩٧٨م)**

يتوزع الاستهلاك العالمي للطاقة بشكل غير متساو بين قارات العالم المختلفة كما هو مبين في الشكل ( ١ ـ ٣ ) الذي يبين التوزيعَ المئوي لاستهلاك الطاقة والسكان في العالم لعام ١٩٧٠م . ومن هذا الشكل نجد أن أمريكا الشمالية ـــ التي يشكل عدد سكانها ٦,٣ ٪ فقط من سكان العالم ـــ تستهلك حوالى ٣٥ ٪ من الطاقة العالمية ، في حين أن قارة آسيا بأكملها ـــ التي يشكل عدد سكانها أكثر من ٥٦ ٪ من سكان العالم ـــ تستهلك ١٥ ٪ فقط من الطاقة العالمية .

إن هذا التوزيع لاستهلاك الطاقة بين قارات العالم لم يتغير كثيراً بعد عام ١٩٧٠م وإن كان قد انخفض قليلاً بالنسبة لأمريكا الشمالية حيث بلغ نحو ٣١,٣ ٪ عام ١٩٧٨م ( نسبة استهلاك الولايات المتحدة شكلت حوالى ٢٨,٦ ٪ من الطاقة العالمية لنفس العام ) .

ويمكن أن نأخذ فكرة عن احتياجات العالم المستقبلية للطاقة إذا علمنا أن الولايات المتحدة التي تستأثر بأكبر نصيب من استهلاك الطاقة العالمي سوف تستهلك بحلول عام ٢٠٠٠م أكثر مما استهلكته عبر تاريخها ، ومن المتوقع أن تتراجع نسبة استهلاكها إلى ٢٥ ٪ من الاستهلاك العالمي وذلك نتيجة لارتفاع معدلات النمو في السكان لبقية العالم عن معدل الولايات المتحدة ونتيجة للتقدم الصناعي المتزايد في الدول النامية وازدياد استهلاك الطاقة .

إن معدل ما يستهلكه الفرد الأمريكي حالياً يزيد عن خمسة أضعاف




الشكل ( ١ ـ ٣ )
التوزيع المئوي لاستهلاك الطاقة والسكان في العالم لعام ١٩٧٠م

ما يستهلكه الفرد العالمي ، في حين أنه من المنتظر أن يصل معدل استهلاك الفرد العالمي إلى حوالى ١ / ٣ معدل الفرد الأمريكي عام ٢٠٠٠م .

يبين الجدول ( ١ ـ ٢ ) استهلاك الطاقة في بعض البلدان العربية والعالمية لعام ١٩٧٨م ، ويبين الجدول ( ١ ـ ٣ ) تطور معدل الاستهلاك الفردي العالمي للطاقة في الفترة ( ١٩٠٠ ـ ١٩٧٨م ) .

| البلد أو المنطقة | الاستهلاك (مليون طن متري) | نسبة الاستهلاك من العالم (٪) | استهلاك الفرد (كغم) |
|---|---|---|---|
| الأردن | ١,٥٩١ | ٠,٠٢ | ٥٣٥ |
| الإمارات العربية المتحدة | ٤,٥٢٦ | ٠,٠٥ | ١٨٥٤٨ |
| الجزائر | ١٢,٧٢٧ | ٠,١٥ | ٦٨٧ |
| سوريا | ٧,٨٣١ | ٠,٠٩ | ٩٦٨ |
| العراق | ٧,٨٠١ | ٠,٠٩ | ٦٣٣ |
| السودان | ٢,٩٠٤ | ٠,٠٣ | ١٧٢ |
| قطر | ٢,٣٨٩ | ٠,٠٣ | ٢٣٦٥٨ |
| الكويت | ٨,١١٢ | ٠,٠٩ | ٦٧٧١ |
| مصر | ١٨,٣٤١ | ٠,٢١ | ٤٦٣ |
| السعودية | ١٢,٨١٥ | ٠,١٥ | ١٣٠٦ |
| أندونيسيا | ٤٠,٨٣٣ | ٠,٤٧ | ٢٧٨ |
| فنزويلا | ٣٩,٢٢ | ٠,٤٥ | ٢٩٨٩ |
| نيجيريا | ٧,٢٩٧ | ٠,٠٨ | ١٠٦ |
| الولايات المتحدة | ٢٥٠٢,١٣٢ | ٢٨,٥٨ | ١١٣٧٤ |
| المكسيك | ٩٢,٦٢١ | ١,٠٦ | ١٣٨٤ |
| أوروبا الغربية | ١٥٦٦,٣٥٨ | ١٧,٨٩ | ٤٢٤٥ |
| الاتحاد السوفييتي | ١٤٤٥,٤٣٩ | ١٦,٥١ | ٥٥٠٠ |
| الصين | ٧٦٦,٣٣٥ | ٨,٧٥ | ٨٣٧ |

الجدول ( ١ ـ ٢ )
استهلاك الطاقة في بلدان مختارة
من العالم العربي وبقية العالم

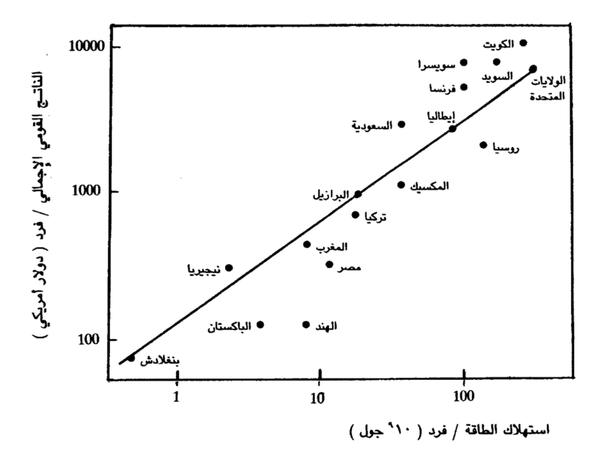
| السنوات | كيلوغرام مكافىء فحم حجري |
|---|---|
| ١٩٠٠ | ٥٩٠ |
| ١٩٥٠ | ١٦٠٠ |
| ١٩٦٠ | ٢١٠٠ |
| ١٩٧٠ | ٢٩٠٠ |
| ١٩٧٨ | ٢٠٧٤ |

**الجدول ( ١ ـ ٣ )**
**تطور معدل الاستهلاك الفردي العالمي للطاقة**

إن الزيادة ــ غالباً ــ في استهلاك الطاقة يصاحبها ارتفاع في مستوى المعيشة ممثلاً في زيادة الناتج القومي الإجمالي ( Gross National Product, GNP ) للبلد .

وكما هو مبين في الشكل ( ١ ـ ٤ ) هناك علاقة خطية بين استهلاك الطاقة الفردي وبين الناتج القومي الإجمالي الفردي . ومن هذا الشكل نرى أن بعض البلدان مثل الولايات المتحدة والكويت وسويسرا والسويد ذات ناتج قومي إجمالي واستهلاك طاقة مرتفعين ، في حين أن هناك بلداناً أخرى كالهند والباكستان ذات ناتج قومي إجمالي واستهلاك طاقة منخفضين .

ازداد استهلاك الطاقة في الأردن بشكل كبير جداً حيث بلغ معدل النمو السنوي في الاستهلاك في الفترة الواقعة بين عامي ( ١٩٧٤ ــ ١٩٨٤م ) نحو ١٣,٦ ٪ ولكنه عاد وانخفض إلى ٣,١ بين عامي ١٩٨٥ و ١٩٧٨، في حين ارتفع الناتج القومي الإجمالي الفردي من حوالى ٥٣٧ ديناراً عام ١٩٨٠م إلى حوالى ٧١٣ديناراً عام ١٩٨٣م، ولكنه عاد وتراجع إلى حوالى ٦٨٠ ديناراً عام ١٩٨٧م ، فالأردن كغيره من الدول النامية يواجه مشكلة الزيادة المتواصلة في معدلات استهلاك الطاقة ، ولعل ذلك يرجع أساساً إلى التوسع والنمو الذي طرأ على مختلف القطاعات الصناعية والتجارية وقطاع النقل وإلى استمرارية نشر خدمة التيار الكهربائي في مختلف المناطق وما يترتب على ذلك من زيادة وتشجيع لاستهلاك الطاقة الكهربائية، إذ انه حتى عام ١٩٧٩م كانت خدمة التيار الكهربائي مقتصرة على ٥٥ ٪ من سكان الأردن فقط.




**الشكل ( ١ ـ ٤ )**
**العلاقة بين الناتج القومي الإجمالي / فرد**
**واستهلاك الطاقة / فرد لبعض البلدان لعام ١٩٧٥م**

# ١ ـ ٤

## أزمات الطاقة : أبعادها وأسبابها والحلول المناسبة

تحسنت ظروف الإنسان المعيشية تحسناً ملموساً خلال القرون الأربعة الأخيرة، خصوصاً في بلدان أوروبا الغربية بعد الثورة الصناعية في القرن السابع عشر ، وبدأت عملية انتشار الآلات تزداد بشكل واسع وذلك بعد اختراع الآلة البخارية وتطورها ، وظهرت ملامح أول أزمة وقود في العالم في بريطانيا متمثلة في حدوث نقص في إمدادات أخشاب الأشجار المستعملة كوقود لهذه الآلات الجديدة ، ولكنه تم السيطرة على هذه الأزمة وذلك باستخدام الفحم الحجري بدلاً من الأخشاب كوقود لهذه الآلات وإحلال فحم الكوك ( Coke ) مكان الفحم النباتي كمصدر للحرارة في أفران صهر الحديد . وهكذا أوجدت الثورة الصناعية طرقاً جديدة زادت من الإنتاجية وساهمت في تحسين ظروف الحياة لقطاع كبير من الناس .

وصلت الصناعات المعتمدة على الفحم الحجري والآلات البخارية ذروتها في أواخر القرن التاسع عشر ، وكان الاستغلال لمصادر الطاقة المتوافرة على أشده في تلك الفترة .

وببزوغ عصر النفط واستخدامه كمصدر أساسي للوقود واكتشاف المولد الكهربائي ( الدينامو ) ، فإن ذلك أحدث تغيراً كبيراً جداً في أنماط الحياة في البلدان الأوروبية. وامتد هذا التغيير فيما بعد ليشمل بلداناً أخرى عديدة خصوصاً البلدان التي اكتشف فيها النفط بكميات كبيرة . ورافق هذا التغير أيضاً تطور استخدام محركات الاحتراق الداخلي ( Internal combustion engines ) في قطاعات الصناعة والنقل والآلات الزراعية ، وبنهاية الحرب العالمية الثانية أصبح

النفط كمصدر للطاقة أرخص بكثير من الفحم الحجري ، مما أدى إلى تحول معظم الصناعات من الفحم الحجري إلى النفط مما زاد الطلب عليه بشكل حاد .

إن هذا التغير في أنماط استغلال الوقود ـــ مع وجود التصنيع الثقيل وزيادة الاعتماد على الآلة ـــ أدى إلى حدوث نقص في إمدادات الوقود ، وأطلق على ذلك اسم أزمة الطاقة ( Energy crisis ) . وكان لقرار بعض الدول العربية المنتجة للنفط في خريف عام ١٩٧٣م بحظر تصدير النفط للغرب أثر مباشر على الارتفاع المفاجيء والحاد في أسعار النفط العالمية ( أربعة أضعاف السعر قبل الحظر ) .

وأدى ذلك إلى ردود فعل عالمية واسعة خصوصاً من قبل البلدان الكبرى المصنعة في أمريكا الشمالية وأوروبا الغربية واليابان التي كانت تعتمد على النفط الرخيص بشكل متزايد في معظم صناعاتها ، ولم يقتصر هذا التأثير على الدول المصنعة بل امتد إلى الدول النامية التي تعتمد على مشتقات النفط كمصدر أساسي لاحتياجاتها من الطاقة وكمصدر هام للأسمدة المستعملة في تخصيب الأراضي الزراعية ، وقد أدى كل ذلك إلى تفاقم ما يسمى بأزمة الطاقة .

كما ذكرنا سابقاً فإن تزايد الطلب على الطاقة يعزى إلى تزايد عدد السكان وزيادة استهلاك الفرد من الطاقة نتيجة للتطور والتقدم التكنولوجي واختراع الإنسان لوسائل الراحة والترفيه وزيادة اعتماده على الآلة في كافة شؤون حياته ، وإذا أراد الإنسان المحافظة على مستوى معيشته وحضارته فلا بد له من إيجاد الحلول المناسبة لمشكلة الطاقة ، والاقتراحات التالية تقدم بعض الحلول الممكنة لأزمة الطاقة :

١ ـــ تقليل اعتماد الإنسان على مصادر الطاقة التقليدية ( غير المتجددة ) من فحم حجري ونفط وغاز طبيعي والتحول إلى مصادر الطاقة المتجددة ما أمكن ذلك ، فهناك الكثير من مصادر الطاقة المتجددة التي لم يتم استغلالها بشكل مرض . فالطاقة الكهرومائية وطاقة الريح ـــ اللتان يمكن الحصول على الطاقة الكهربائية منهما مباشرة ـــ لم يتم استغلال سوى نسب قليلة منهما ، أما طاقة المد والجزر ، فلا يتم استغلال سوى جزء بسيط منها في أماكن محدودة من العالم، وكذلك الحال بالنسبة للطاقة الحرارية الجوفية . ويمكن أن تلعب بعض المصادر الثانوية الأخرى كأخشاب الأشجار ومخلفات الزراعة والقمامة دوراً هاماً في حل مشكلة الطاقة إذا تم التوسع في استغلالها خصوصاً في الدول النامية. فهي

مصادر متوافرة في كل مكـان تقريبـاً وبشكل مستمـر . ويرى بعض المختصين أن الطاقة النووية يمكن أن تقدم حلاً جذرياً لأزمة الطاقة إذا تم استغلالهـا على نطاق واسع، خصوصاً بعـد التقدم العلمي الكبيـر في تصنيـع المفاعـلات النووية، وإن كانت مشكلة التلـوث وأخطار الحـوادث قائمـة بالنسبـة لهذا المصـدر الهائـل من الطاقة ، وأهم مشاكل التلوث النووي هي مشكلة التخلص من النفايات المشعة التي تولدها المفاعلات النووية .

بقي أن نشير إلى أهم مصدر من مصادر الطاقـة المتجددة ألا وهـو الطاقـة الشمسية، فعلى الرغم من التقدم الكبير الذي تم إحرازه في استغلالها في بعض التطبيقات المباشـرة كتسخين المياه في المنـازل وتحلية الميـاه المالحـة والأفران الشمسية وغيرها ، إلا أن أهم مجال لاستخدامها في إنتاج الطاقة الكهربـائية على نطاق واسـع لا يزال محدوداً ومحصوراً في بعض الدول المتقدمـة علمياً ، وأخيـراً فـإن هناك بعض المصـادر الأخرى غيـر المتجددة التي لا يتم استغـلالها بشكـل واسـع مثـل الصخر الـزيتي ( Shale Oil ) الذي يتوافر منـه احتياطي كبيـر في الأردن .

٢ ــ تقليل الفواقد أو الضياعات من أجهزة تحويل الطاقة خصوصاً محطات التوليد الكبيرة، حيث انه بالإمكان الاستفادة من الغازات العادمة ذات درجة الحرارة العالية بدلا من تركها تنطلق في الجو ، وهناك وسائل أخرى عديدة لتقليـل الفواقـد من هذه المحطات . أمـا على مستوى الأفـراد فإنـه بالإمكـان توفيـر الطاقـة وذلك بواسطة الاستخـدام الصحيـح لأجهزة تحـويل الطـاقة في المنـازل . ويرى بعض الخبراء المختصين أنه بالإمكان توفير نصف الطاقة الحرارية المنتجـة في المنازل في وقتنا الحاضـر إذا تم استخدام أجهـزة الطاقـة في البيوت بـوعي أكبر وتجنب الأفـراد بعض الممارسـات المبالـغ بهـا والتي تؤدي إلى هدر الطـاقـة ، كتشغيـل أجهزة التدفئة في الأيام المعتدلة أو عدم إيقافها عن العمل عنـد الخروج من البيت لفترات طويلة .

# ١ ـ ٥
# طبيعة الطاقة

## ١ ـ ٥ ـ ١ الشغل والطاقة :

يُعرف الشغل بأنه حاصل ضرب القوة في المسافة التي تتحركها نقطة تأثير القوة في اتجاه هذه القوة . ويمكن تعريف الطاقة بأنها القابلية لإنجاز شغل . فعند رفع جسم ( كتلة ) مسافة معينة فإنه يلزم قوة أكبر بقليل من وزن هذا الجسم في اتجاه معاكس لاتجاه تأثيره، وبرفع هذا الجسم إلى مستوى أعلى من مستواه الأصلي فإنه يُبذلُ عليه شغل يُختزن فيه على شكل طاقة ( طاقة وضع )، ويمكن استرجاع هذا الشغل عند سقوط الجسم إلى مستواه الأصلي .

هناك أشكال متعددة من القوى في الطبيعة مثل قوة المرونة وقوة الجاذبية وقوة الرياح والقوى المائية وغيرها . وجميع هذه القوى قادرة على إنجاز شغل .

## ١ ـ ٥ ـ ٢ الطاقة والقدرة ووحدات القياس :

تُعرف القدرة بأنها معدل الطاقة المبذولة ( الشغل المبذول ) في وحدة الزمن ( $P = dE / dt$ ) . وفي النظام العالمي المعياري للوحدات ( SI ) يقاس كل من الشغل والطاقة بوحدة الجول (J) أو مضاعفات هذه الوحدة مثل الكيلوجول ( $KJ = 1000\ J$ ). ولأغراض الفيزياء النووية هناك وحدة صغيرة جداً للشغل أو الطاقة هي الإلكترون ـ فولت ( $eV = 1.6 \times 10^{-19}\ J$ ) ، ويُعبر عن الطاقة أحياناً بوحدات القدرة والزمن مثل وحدة الواط ـ ساعة ( W.h ) أو الكيلوواط ـ ساعة ( $KW.hr = 3.6 \times 10^{6}\ J$ ) .

أمـا وحدة القيـاس الأساسيـة للقدرة في النظـام العـالمي فهي الـواط (W) ومضـاعفـات هـذه الـوحـدة هي : الكيلـوواط ( KW = 1000 W ) ، والميغـاواط ( $MW = 10^6$ W ) ، والجيجـاواط ( $GW = 10^9$ W ) ، والتتـراواط ( $TW = 10^{12}$ W ) .

ويعبر عن القدرة أيضـاً بوحـدة الحصان ( hp ) . وفي النظـام العالمي فـإن الحصان يساوي ٧٣٥ واط ( 1hp = 735 W ) . ويمكن التعبيـر عن القدرة أحيـاناً بـوحـدات الطـاقة والـزمن مثـل الجـول في الثـانيـة ( J / s ) أو الكيلـوجـول في الثانية ( KJ / s ) .

### ١ ـ ٥ ـ ٣ أشكـال الطاقـة :

هناك شكلان رئيسان للطاقة هما الطاقة الانتقالية ( Transitional ) والطاقة المخزنة ( Stored ) . فالطاقة الانتقاليـة هي طاقـة متحركـة يمكنها الانتقـال عبر حدود نظام مثلاً ، كما هو الحال بالنسبة للطاقة الحرارية ، والطاقة المخـزنة تتوافر على شكل كتلة كالوقود ( طاقة كيميائية ) أو موقـع في مجال قوة كجسم في مجـال الجاذبية الأرضية ( طاقة وضـع ) .

من الممكن تحـويل الطـاقة المخـزنـة بسهـولـة إلى أحـد أشكـال الطـاقـة الانتقالية . وبشكل عام يمكن حصـر أشكال الطـاقة المختلفـة في ست مجموعـات أساسية هي الطاقة الميكـانيكية والطـاقة الكهـربائيـة والطاقـة الكهرومغنـاطيسية والطاقة الكيميائية والطاقة النووية والطاقة الحرارية .

في علم الديناميكا الحرارية ( الثيرمـوديناميكـا ) تعرف الطـاقة الميكـانيكية بأنها الطـاقة التي يمكن استخـدامها لـرفـع وزن معين . ويعرف الشكـل الانتقالي للطاقة الميكـانيكية بـالشغل ، ويمكن تخـزين هذه الطـاقة كطـاقة وضـع أو طـاقة حركة ، فطاقة الوضـع هي الطاقة التي تمتلكها المادة أو الكتلة نتيجة لوجودها في مجـال قوة، كالطاقـة التي يمتلكها جسم يـرتفـع عن سطـح الأرض مسافـة معينة نتيجة لوجـوده في مجال الجـاذبية الأرضية، أو الطاقـة المصاحبـة لغاز مضغوط، أو الطاقة التي يمتلكها جسم حديـدومغناطيسي كالحديد أو النيكل نتيجـة لوجـوده في مجال مغناطيسي، أو طـاقة المـرونة المختـزنة في زنبـرك مضغوط . أمـا طاقـة الحركة فهي الطاقة التي تمتلكهـا كتلة من المـادة نتيجة لحـركتها بـالنسبة لجسم ( مـرجـع ) آخر ، والحـدافة أو عجلـة التطايـر ( Flywheel ) تعتبر مثـالاً لنظـام

يختزن الطاقة الميكانيكية على شكل طاقة حركة . إن الطاقة الميكانيكية هي شكل مفيد جداً من أشكال الطاقة لأنه يمكن تحويلها بسهولة وبكفاءة عالية إلى أشكال أخرى للطاقة .

الطاقة الكهربائية هي الطاقة المصاحبة لتدفق الإلكترونات أو تجمع هذه الإلكترونات. وتقاس هذه الطاقة عادة بوحدات القدرة والزمن كوحدات الواط ـ ساعة ( Watt hours ) أو الكيلوواط ـ ساعة ( Kilo Watt hours ) ، والشكل الانتقالي للطاقة الكهربائية هو عبارة عن تدفق للإلكترونات وغالباً على شكل تيار كهربائي في موصل معدني . ويمكن تخزين الطاقة الكهربائية كطاقة مجال كهروساكن ( Electrostatic-Field ) أو طاقة مجال حثي ( Inductive-Field ) ، فطاقة المجال الكهروساكن هي الطاقة المصاحبة لمجال كهربائي ناتج عن تجمع للشحنات ( الإلكترونات ) على صفائح مكثف ( Capacitor ) وطاقة المجال الحثي ـ تسمى أحياناً بطاقة المجال الكهرومغناطيسي ـ هي الطاقة المصاحبة لمجال مغناطيسي ناتج عن مرور تيار كهربائي في ملف حثي .

والطاقة الكهربائية كالطاقة الميكانيكية تعتبر شكلاً مرغوباً به لأنه يمكن تحويلها بسهولة وكفاءة إلى أشكال أخرى من الطاقة .

الطاقة الكهرومغناطيسية هي الطاقة المصاحبة للإشعاع الكهرومغناطيسي وتقاس هذه الطاقة بوحدات الإلكترون ـ فولت ( eV ) أو الميغاإلكترون ـ فولت ( MeV ) .

وتعتبر هذه الطاقة شكلاً نقياً للطاقة حيث انه لا يصاحبها أي كتلة وتتوافر على شكل طاقة انتقالية فقط ، تنتقل بسرعة الضوء . وتحسب الطاقة المتوافرة في الأمواج الكهرومغناطيسية من المعادلة :

$$E = h f = \frac{hc}{\lambda} \qquad (١ - ٧)$$

حيث :

E : طاقة الأمواج (J) ،

h : ثابت بلانك ( $6.626 \times 10^{-34}$ J.s ) ،

$f$ : التردد مقاساً بوحدة الهيرتز ( Hz ) ،

$\lambda$ : طول الموجة (m) ،

c : سرعة الضوء ( $3 \times 10^8$ m / s ) ،

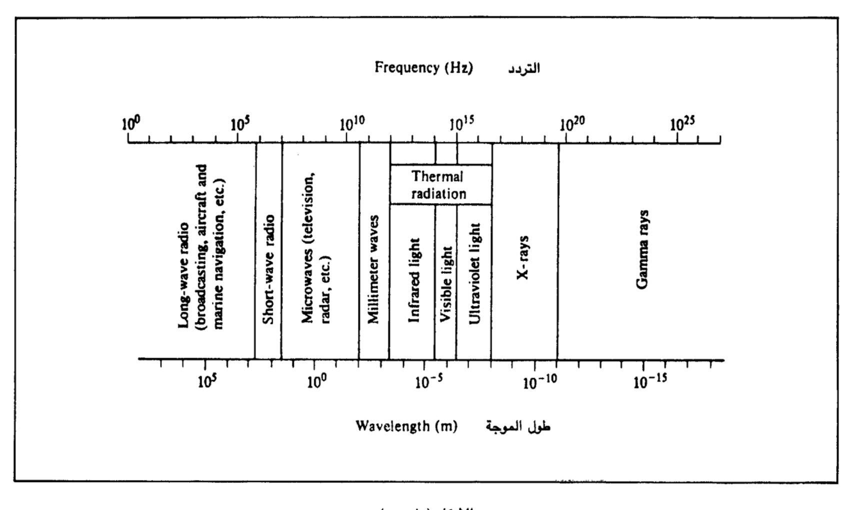
نجد من هذه المعادلة أن الطاقة الموجبة تتناسب طردياً مع تردد الموجة وعكسياً مع طول هذه الموجة . وهناك أنواع متعددة للإشعاع الكهرومغناطيسي تعتمد على طول الأمواج أو طبيعة المصدر المشع . وتعتبر أشعة جاما ( Gamma ) واحدة من أكثر أنواع الأشعة الكهرومغناطيسية امتلاكاً للطاقة ، وأغلب هذه الأشعة تبعث من أنوية الذرات . والإشعاع الحراري هو إشعاع كهرومغناطيسي ينتج عن اهتزاز الذرات . ونطاق الإشعاع الكهرومغناطيسي الحراري واسع ، ويشمل الإشعاع ذو درجة الحرارة العالية أو الأشعة فوق البنفسجية ( Ultra violet) والنطاق الضيق للأشعة المرئية ( Visible radiation ) ونطاق الإشعاع ذو درجة الحرارة المنخفضة أو الأشعة تحت الحمراء ( Infra red ) . ويلي الإشعاع الحراري في طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي ( أنظر الشكل ( ١ ـ ٥ ) ) أشعة الميكروويف والمليميتروويف المستعملة في أفران الميكرويف والرادار ( Radar ) ، أما أشعة أمواج الراديو ( Radio wave ) فإنها تحتل الطرف الأيسر ( طول الموجة الأكبر ) من طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي كما هو مبين في الشكل ( ١ ـ ٥ ) .

الطاقة الكيميائية هي الطاقة المحررة ( المنطلقة ) نتيجة لتفاعل ذرتين أو أكثر أو جزيئين أو أكثر أو خليط منها لتتحد مع بعضها لإنتاج مركب كيماوي أكثر ثباتاً .

وتوجد الطاقة الكيميائية على شكل طاقة مختزنة فقط ، ويسمى التفاعل الذي يطلق الحرارة بالتفاعل الطارد للحرارة ( Extho thermic reaction ) ، وفي بعض التفاعلات الكيميائية يتم امتصاص الحرارة ، وتسمى هذه التفاعلات بالتفاعلات الماصة للحرارة ( Endothermic reactions ) ويعتبر الاحتراق ــ والذي هو تفاعل كيميائي طارد للحرارة ــ أكثر مصادر طاقة الوقود أهمية للجنس البشري .

الطاقة النووية هي نوع آخر من الطاقة الموجودة على شكل طاقة مختزنة فقط ، ويتم تحرير هذه الطاقة خلال التفاعلات النووية المختلفة ، وتقاس الطاقة المحررة من التفاعل النووي عادة بالميغا إلكترون ــ ڤولت ( Mev ) لكل تفاعل .

وبشكل عام هناك ثلاثة أنواع من التفاعلات النووية وتشمل الانحلال




الشكل ( ١ ـ ٥ )
طيف الإشعاع الكهرومغناطيسي

أو الاضمحلال الإشعاعي ( Radiactive decay ) ، والانشطار النووي ( Fission ) ، والاندماج النووي ( Fusion ) .

الشكل الأخير من أشكال الطاقة هو الطاقة الحرارية المصاحبة لاهتزازات الذرات والجزيئات للمادة، وتعتبر الطاقة الحرارية شكلاً أساسياً من أشكال الطاقة من حيث انه بالإمكان تحويل كافة أشكال الطاقة الأخرى بشكل كامل إلى طاقة حرارية في حين أن العملية العكسية يحدّها القانون الثاني في الديناميكا الحرارية بشكل كبير .

والشكل الانتقالي للطاقة الحرارية هو الحرارة ( Heat ) ، ويمكن تخزين الطاقة الحرارية في معظم المواد على شكل حرارة محسوسة ( Sensible heat ) أو حرارة كامنة ( Latent heat ) .

# ١ ـ ٦
# مصــــادر الطــاقــة

## ١ ـ ٦ ـ ١ مـقـدمـة:

بالإمكان تصنيف مصادر الطاقة إلى فئتين عامتين :

١ ــ الطاقة السماوية ( الفضائية ) أو الطاقة القادمة من خارج نطاق الكرة الأرضية ، وهي الطاقــة التي تصل إلى الأرض من الفضاء الخارجي. وتشمــل هذه الطاقة جميــع المصادر التي يمكن أن تزود الأرض بالطاقــة من الفضاء الخارجي. وتتضمن هذه المصادر الطاقة الكهرومغناطيسية وطاقة الجاذبية وطاقــة الجسيمات من النجوم والقمر والكواكب بالإضافة إلى طاقة الوضــع للنيازك التي تدخل الغلاف الغازي للكرة الأرضية .

في الواقــع فإن هنـاك مصدرين فقط من مصــادر الطاقــة الفضائيــة يستفاد منهما فعلاً في إنتاج أشكال أخرى من الطاقة، وهما الطـاقة الكهـرومغناطيسيــة من شمس كرتنا الأرضية وتسمى بالطاقة الشمسيــة المباشــرة وطاقــة الجاذبيــة للقمر التي تسبب حدوث ظاهرتي المد والجزر في البحار والمحيطات . إن مصادر الطاقة الفضائية جديرة بالاستغلال بأكبر قدر ممكن لكونها مصادر طاقة مستمرة غير قابلة للنضوب أو الفناء ولأنها غير ملوثة للبيئة نسبياً، وهذا اعتبار هــام جداً كمــا سنرى فيما بعد .

٢ ــ الطــاقــة المتــوافــرة ( Capital ) على سطــح الأرض أو في بــاطــن الأرض . تعد الطاقة الكيميائية المتوافرة في وقود المستحــاثات ( نفط وغــاز طبيعي وفحم حجري ) ــ والتي يتم تحريرها في تفاعل كيميــائي ( احتراق ) ــ المصــدر الـرئيس من مصادر الطاقة المتوافرة، يليهــا في الأهمية الطـاقة النــووية التي يتم

تحريرها نتيجة لتفاعل نووي يتحول فيه جزء من كتلة الأنوية المتفاعلة إلى طاقة حسب معادلة اينشتاين ( Einstein ) .

وتعتبر الطاقة الحرارية الجوفية ( Geothermal energy ) إحدى المصادر الهامة والرئيسة من مصادر الطاقة المتوافرة، وتوجد هذه الطاقة في مصائد تحت وفي القشرة الأرضية الصلبة على شكل بخار وماء حار وصخور حارة .

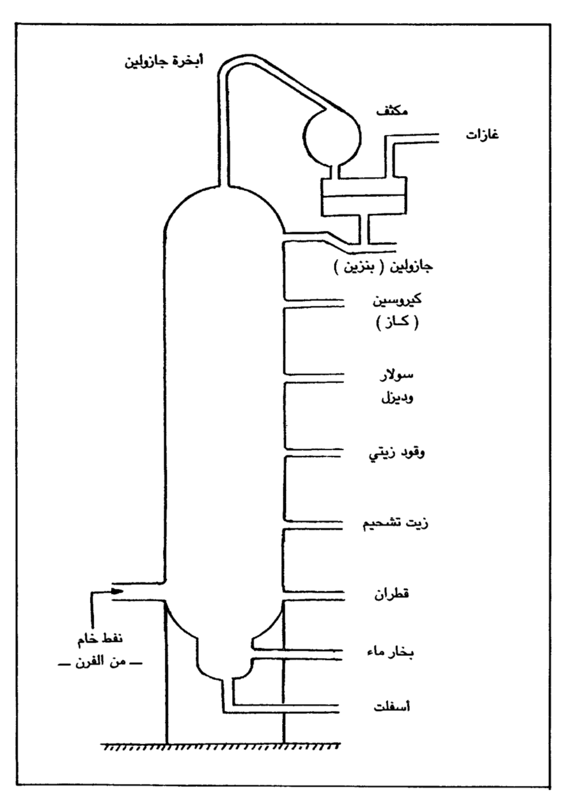
## ١ - ٦ - ٢ وقود المستحاثات : ( Fossil fuels )

يمكن تصنيف وقود المستحاثات عموماً إلى ثلاث فئات رئيسة، هي الفحم الحجري والنفط والغاز الطبيعي، وهناك أنواع أخرى من وقود المستحاثات أقل أهمية من هذه الفئات الرئيسة مثل الزيت الصخري ( Shale oil ) ورمال القار الزيتي ( Tar-sand oil ) . وجميع هذه الأصناف نتجت عن تحجر ( Fossilization ) المركبات الهيدروكربونية ذات الصيغة الكيميائية العامة $C_X ( H_2 O ) y$ والتي تكونت أساساً في عملية التركيب أو التمثيل الضوئي ( Photosynethsis ) في النباتات حيث تحولت الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية .

يسود الاعتقاد بأن معظم وقود المستحاثات تكونت قبل حوالى ٣٢٥ مليون سنة من كربوهيدرات النباتات الميتة التي تحولت بفعل الضغط والحرارة وغياب الأكسجين إلى مركبات هيدروكربونية لها الصيغة الكيميائية العامة $C_X H_X$ ، ولهذا السبب فإن جميع وقود المستحاثات تتكون من مركبات هيدروكربونية ، بشكل أساسي .

### ١ ــ النفط : ( Petroleum )

هناك نظريتان تفسران تكون البترول في باطن الأرض، هما النظرية العضوية والنظرية اللاعضوية. ويرى أصحاب النظرية الأولى أن النفط عبارة عن مواد هيدروكربونية مزيجة نتجت عن تحلل مواد عضوية نباتية أو حيوانية بفعل الضغط والحرارة في باطن الأرض. وأغلب هؤلاء يرون بأن النفط يعود إلى تحلل بقايا كائنات بحرية مثل الجمبري والاسكابوريا والقشريات والصدفيات والمحاريات، والأقلية الباقية ترى أن النفط هو بقايا كائنات عضوية نباتية مختلفة . أما أصحاب النظرية




الشكل ( ١ ـ ٦ )
برج تقطير النفط الخام

اللاعضوية فإنهم يرون أن النفط عبارة عن مـواد هيدروكـربونيـة نتجت عن تفاعـل مركب كربيد الحديد ( أحد مكونات القشـرة الأرضية ) مـع بخـار الماء حيث أدى هذا التفاعل إلى تكون مادة شبيهة بالاستيلين تحولت إلى نفط خام بمرور الزمن .

يؤيد أغلب المختصين النظرية العضوية الحيوانية ويوردون أدلـة على صحة اعتقادهم مثل احتواء النفط على مادتي النيتروجين والبادافين واللتيـن لا توجـدان إلّا في بقايا الكائنات الحية النباتية والحيوانية .

يوجد النفط في فراغات ( فجوات ) ضخمة في الصخـور الرسوبية. ويصنف النفط الخام عادةً إلى ثلاث فئات بالاعتماد على ما يتبقى منه بعد تقطير المـركبات الخفيفة، هي النفط الخام ذو القـاعدة البـارافينية ( Paraffin - based crudes ) والنفط الخام ذو القاعـدة الاسفلتية ( Asphalt - based crudes ) والنفط الخـام ذو القاعدة المختلطة . يتكون النفط الخام من نسب وزنية متفاوتة لعدة عناصـر هي الكربون ( ٨٤ ــ ٨٧ ٪ ) والهيـدروجين ( ١١ ــ ١٦ ٪ ) والأكسجين والنيتروجين ( صفر ــ ٧ ٪ ) والكبريت ( صفر ــ ٤ ٪ ) .

على الرغم من اكتشـاف البترول منذ زمن طويل ــ ١٨٥٩م ــ إلّا أن ابراج التقطيـر لفصـل مكـوّنـات البتـرول عن بعضهـا لم تُستعمـل إلاَّ في بـدايـة هـذا القرن . وتعتمد عملية التقطير الجزئي للنفط أساساً على أنه مـزيـج من عدد كبيـر من مركبات هيدروكربونية ذات نقاط غليان مختلفة يمكن فصلها بعضهـا عن بعـض بـاختلاف درجـات الحرارة، حيث يمكن الحصـول على المواد ذات القـابلية الأعلى للتطـاير عنـد درجات حـرارة منخفضة أكثـر ، مما يؤدي إلى انفصـال المـركبـات المختلفـة للنفط عن بعضهـا في بـرج التقطيـر ــ كمـا هـو مبيـن في الشكـل ( ١ ـ ٦ ) ــ حسب درجات الحرارة التي تزداد كلما اتجهنا إلى الأسفل .

يعتبر الجازولين ( البنزين ) من أهم المنتجات النفطية اللازمة لوسائط النقل المختلفة . ولهذا تم تطوير طرق جديـدة لزيـادة نسبة الجـازولين المستخرجـة من النفط الخام عن النسبة الطبيعية الموجودة والبالغة ٢٠ ٪ من وزنه . من هذه الطرق ما يسمى بطريقة التكسير وفيها تنحلّ الجزيئات الكبيرة إلى جزيئات أخرى أصغـر وأخف ، وبـذلك يمكن إنتـاج الجازولين من الكيـروسين ( الكاز ) والـوقود الـزيتي ( Fuel oil ) وقد تتم هذه العملية بفعل الضغط والحرارة وتسمى بالتحلل الحراري ( Pyrolysis ) أو بفعل العوامـل المساعـدة ( Catalytic cracking ) حيث أمكن بذلك زيادة نسبة الجازولين المنتجة من النفط الخام إلى ٤٥ ٪ .

يحتل النفط في وقتنا الحاضر المرتبة الأولى من بين مصادر الطاقة الأخرى في العالم من حيث نسبة الاستهلاك. وتتزايد هذه النسبة بمعدل أكبر من غيرها كما هو مبين في الجدول ( ١ ـ ٤ ) .

| مصدر الطاقة | نسبة مساهمة المصدر من إجمالي مصادر الطاقة ٪ | | |
|---|---|---|---|
| | ١٩٧٣ | ١٩٧٥ | ١٩٧٨ |
| نفط | ٤٥,٨ | ٤٣,٩ | ٤٤ |
| غاز طبيعي | ١٧,٨ | ١٨ | ١٨ |
| فحم حجري | ٣٠,٤ | ٣٠,٧ | ٣٠ |
| طاقة كهرومائية | ٥,٢ | ٥,٩ | ٦,٤ |
| طاقة نووية | ٠,٩ | ١,٥ | ١,٦ |
| المجموع | ١٠٠ | ١٠٠ | ١٠٠ |

الجدول ( ١ ـ ٤ )
تطور الأهمية النسبية لاستهلاك مصادر الطاقة عالمياً

من أهم نواحي استعمالات النفط ما يلي :

١ ـ استخدام الكيروسين ( الكاز ) في عمليات التسخين المنزلية والطهو والإضاءة واستعمال الافتور والافتاج في محركات الطائرات النفاثة .

٢ ـ استخدام الجازولين ( Gasoline ) في محركات السيارات .

٣ ـ استخدام الديزل ( Diesel ) والوقود الزيتي ( Fuel - oil ) في القطارات والبواخر والمصانع ..

٤ ـ استخدام مختلف مركبات النفط في الآلات الزراعية .

٥ ـ استخدام النفط في صناعات الورق والمنسوجات والمطاط الصناعي والألياف الصناعية والمفرقعات، بالإضافة إلى بعض الصناعات الغذائية،واستخدامه لاستخلاص بعض المبيدات الكيميائية، وكذلك استخلاص زيوت التشحيم ومادة الفازلين المستعملة في صناعات المستحضرات الطبية ومستحضرات التجميل. ويستخلص منه أيضاً

شمع البارافين الذي تصنع منه الشموع ، بالإضافة إلى استخلاص الجليسرين والأسيتون والكحول الميثيلي من الغازات الناتجة عن عملية التقطير .

٦ ــ نحصل من النفط على مادة الإسفلت المستخدمة في تعبيد الطرق .

للنفط خصائص عديدة من أهمها القيمة الحرارية والجاذبية النوعية ونقطة الوميض ( Flash point ) ونقطة الانصهار ( Pour point ) ، وتقاس القيمة الحرارية أو المحتوى الحراري بوحدات ( KJ / kg ) . وتعرف الجاذبية النوعية للسائل بأنها كثافة هذا السائل مقسومة على كثافة الماء عند درجة حرارة ١٥,٦° س ( س = درجة مئوية ) .

وتعرف نقطة الوميض للوقود السائل بأنها أقل درجة حرارة للسائل يكون عندها بخار الوقود المتولد فوق سطح السائل قابلاً للاشتعال ( Will Just ignite ) وعند درجة حرارة أعلى منها بقليل ( تسمى نقطة الاشتعال Fire point ) فإن بخار الوقود المتولد يشتعل وتبدأ عملية الاحتراق للوقود . وتعرف نقطة الانصهار لاحدى مشتقات النفط بأنها أقل درجة حرارة للمشتقة النفطية تبدأ عندها عملية السيلان ( Flow ) لهذه المشتقة .

يمتاز النفط عن الفحم الحجري بأنه أسهل في المناولة ( Handling ) والخزن والنقل وأسهل في عملية الحرق ولا يخلف احتراقه سوى كمية قليلة من الرماد مقارنة بالفحم الحجري ، وهناك بعض المشاكل في عملية حرق النفط ، فعلى الرغم من أن نسبة الكبريت قليلة إلّا أن عملية التخلص منها صعبة . وهناك أنواع من النفط الخام ذات محتوى لا بأس به من الكبريت والتي تُنتج أكاسيد الكبريت الملوثة للجو عند حرقها ، بالإضافة إلى تفاعل هذه الأكاسيد مع بخار الماء لإنتاج حامض الكبريتيك الذي يؤدي إلى تآكل واهتراء المواد الحديدية كما هو الحال في عوادم السيارات . وهناك أيضاً مشكلة احتواء بعض الأنواع على عنصر الفاناديوم ( $V_a$ ) الذي ينتج أكاسيد الفاناديوم خلال الاحتراق ومن ضمنها خامس أكسيد الفاناديوم ( $V_a O_5$ ) الذي يتسبب في حدوث تآكل سريع للمواد الحديدية الموجودة في معظم المراجل .

بلغ الاحتياطي العالمي المؤكد ( المعروف ) من النفط لعام ١٩٧٩م حوالى ٦٤٢ بليون برميل ، تساهم دول الأوبك بحوالى ٣٤٢ بليون برميل من هذا

الاحتياطي، وقد قدر احتياطي المملكة العربية السعودية لوحدها عام ١٩٧٩م بحوالى ٣٠٠ بليون برميل أي ما يعادل حوالى ٤٦,٧ ٪ من الاحتياطي العالمي، في حين يزيد الاحتياطي العربي الكلي عن ٦٠ ٪ من الاحتياطي العالمي .

## ٢ ــ الفحم الحجري ( Coal )

يُعتقد أن الفحم الحجري يعود لأصل نباتي حيث لزمت طبقة من المواد النباتية سمكها عشرون قدماً لتكوين طبقة من الفحم الحجري سمكها قدم واحد . ولقد تحولت هذه البقايا النباتية بغياب الهواء وتحت التأثير المشترك للضغط ودرجة الحرارة المرتفعين في باطن الأرض إلى مادة الخثّ ( Peat ) التي هي عبارة عن وقود من درجة واطئة ( Low - grade fuel ) ، ومن ثم تحولت هذه المادة إلى الفحم الحجري البني ( Brown coal ) ، ثم إلى فحم الليجنايت ( Lignite ) ، ثم إلى الفحم شبه القاري ( Subbituminous ) ، ثم إلى الفحم القاري ( Bituminous ) ، وأخيراً إلى فحم الأنثراسايت ( Anthratic coal ) .

وقد رافق عمليات التحول هذه زيادة في صلابة الفحم ونقص في محتواه من الأكسجين والهيدروجين والرطوبة وزيادة في محتواه من الكربون .

يوجد الفحم الحجري على شكل طبقات ( Seams ) في القشرة الأرضية . وهناك تباين كبير في سماكات هذه الطبقات والتي تقل في بعض المناطق عن ٣٠ سنتمتراً في حين تصل في بعض المناطق إلى حوالى ١٣٠ متراً كما هو الحال في فوشون ( Fushun ) بمنشوريا ( Manchuria ) ، ويصنف الفحم الحجري بعدة طرق منها طريقة الجمعية الأميريكية لفحص المواد ( ASTM ) التي تصنف الفحم إلى أربع فئات رئيسة تبعاً لعمرها ــ زمن تكونها ــ وهذه الفئات هي :

### ١ ــ الفحم الأنثراسيتي : ( Anthracitic )

ويعرف أيضاً بالفحم الصلب، إذ انه أكثر أنواع الفحم صلابة وجودة، ودرجة الاشتعال لهذا الفحم مرتفعة، وعند احتراقه فإنه لا يخلف سوى القليل من الرماد ويتميز بلونه الأسود الغامق ، ويوجد هذا الفحم عادةً على عمق كبير، ولهذا فإن تكاليف استخراجه عالية. ولا يستعمل هذا الفحم في الصناعة إلّا على نطاق محدود لأنه أقل أنواع الفحم توافراً . وينقسم هذا النوع إلى ثلاث مجموعات :

( أ ) الميتا انثراسايت ( Meta Anthracite ) تبلـغ نسبة الكـربون فيـه ٩٨ ٪ أو أكثـر، بينمـا تبلـغ نسبـة المـواد المتطـايـرة ( Voltaile matter ) فيـه ٢ ٪ أو أقـل، وهـذا النـوع لا يتكتـل ( Non agglomerating ) .

(ب) الأنثـراسايت ( Anthracite ) تتـراوح نسبة الكـربون فيـه ما بين ٩٢ ــ ٩٨ ٪ ونسبة المواد المتطايرة ما بين ٢ ــ ٨ ٪، وهذا النـوع لا يتكتل .

( ج ) شبه الأنثراسايت ( Semianthracite ) تتراوح نسبة الكربـون فيه مـا بين ٨٦ ــ ٩٢ ٪ ونسبـة المـواد المتطـايـرة ٨ ــ ١٤ ٪ وهـو لا يتكتل أيضاً .

**٢ ــ الفحم القاري (البيتوميني) : ( Bituminous )**

أكثر أنواع الفحم انتشاراً ويعرف أيضاً بالفحم اللين ( Soft )، وهو سهل الاحتراق ويعطي لهباً أصفر اللون عندحرقه. ولون هذا الفحم أسود ولا يتشقق عند تعرضه للهواء. ينقسم هذا النوع إلى ثلاث مجموعات ثانوية تبعاً لنسبـة الكربـون الموجودة فيه ــ جميعها لا تتكتل في العادة ــ :

( أ ) الفحم القاري ذو نسبة المواد المتطايـرةالمنخفضة، وتتـراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٧٨ ــ ٨٦ ٪ ونسبـة المواد المتطـايرة مـا بين ١٤ ــ ٢٢ ٪

(ب) الفحم القاري ذو نسبة المواد المتطايرة المتوسطة، وتتراوح نسبـة الكربون فيه ما بين ٦٩ ــ ٧٨ ٪ ونسبـة المواد المتطـايرة مـا بين ٢٢ ــ ٣١ ٪

( ج ) الفحم القاري ذو نسبة المواد المتطايرة العالية، تبلغ نسبة الكربون فيـه ٦٩ ٪ أو أقل، في حين تبلـغ نسبـة المـواد المتطـايـرة ٣١ ٪ أو أقـل ، وتتــراوح قيمتــه الحــراريــة بيــن ٢٤٤٠٠ ــ ٣٢٦٠٠ كيلوجول / كغم. وتقسم هذه المجموعـة أيضاً إلى ثـلاث مجموعـات إضافية حسب القيم الحرارية للفحم .

### ٣ ــ الفحم شبه القاري : ( Subbituminous )

في حين يستخدم الفحم القاري في صناعة الحديد والصلب وذلك بعد تحويله إلى فحم الكوك ــ الذي يعتبر المصدر الرئيس للحرارة اللازمة لصهر المعادن ــ فإن الفحم شبه القاري ــ الذي يمكن اعتباره نوعاً سيئاً من الفحم القاري ــ يستخدم في إنتاج الغازات. كما تستخلص من عملية تقطيره مشتقات هامة تدخل في الكثير من الصناعات مثل صناعة الأصباغ والمطاط والأحماض والأسمدة وغيرها . ويقسم هذا النوع إلى ثلاث مجموعات ثانوية تبعاً لقيمها الحرارية. هي الفحم شبة القاري A والفحم شبه القاري B والفحم شبه القاري C. والقيم الحرارية لهذه المجموعات الثلاث على الترتيب تتراوح ما بين ( ٢٤٤٢٠ ــ ٢٦٧٥٠ ) و ( ٢٢٠٩٠ ــ ٢٤٤٢٠ ) و ( ١٩٣٠٠ ــ ٢٢٠٩٠ )كيلوجول / كغم.

### ٤ ــ فحم الليجنايت : ( Lignite )

ويسمى أيضاً الفحم الأسمر، وهو من الأنواع الصلبة وتتراوح نسبة الكربون فيه ما بين ٦٠ ــ ٧٥ ٪ ويعطي عند حرقه نسب عالية من الدخان والشوائب المتطايرة ، وهو ذو قيمة أو محتوى حراري منخفض مقارنة بالأنواع الأخرى. لذلك فإنه يعتبر من الأنواع الرديئة ذات الاستعمال المحدود. وينقسم هذا النوع إلى مجموعتين ثانويتين تبعاً للقيمة الحرارية وهي: فحم الليجنايت A الذي تتراوح قيمته الحرارية ما بين ١٤٦٥٠ ــ ١٩٣٠٠ كيلوجول / كغم وفحم الليجنايت B الذي تقل قيمته الحرارية عن ١٤٦٥٠ كيلوجول / كغم .

## طرق تحليل الفحم ( Coal analyses )

هناك طريقتان أساسيتان تستعملان لتحليل الفحم الحجري وكلا الطريقتين تعطيان النسب الكتلية ( الوزنية ) لمكونات الفحم بعد استبعاد محتوياته من الرطوبة ( فحم جاف Moisture - free ) ) والرماد( Ash - free ) وهما التحليل التقريبي والتحليل النهائي ، ولكنه يلزم تحويل هذه التحليلات لكي تشمل نسب الرطوبة والرماد عند إجراء حسابات الاحتراق والمناولة للفحم. وتسمى التحليلات الناتجة عن عملية التحويل هذه بتحليلات الفحم عند الحرق ( As - burned ) وعند الاستلام ( As - received ) .

١ ـ التحليل التقريبي : ( Proximale analysis )

تعتبر هذه الطريقة أبسط طريقة لتحليل الفحم وهي تعطي النسب الكتلية لكل من الكربون الثابت ( FC ) والمادة المتطايرة ( VM ) والرطوبة ( M ) والرماد ( A ) في الفحم . يتم هذا التحليل بأخذ عينة من الفحم المسحوق وتوزن بعناية وتسخن إلى درجة حرارة ١١٠° س لمدة ٢٠ دقيقة ، ثم يُعاد توزين العينة فتكون نسبة الكتلة للرطوبة هي النقص في الوزن بعد التسخين مقسوماً على الوزن الأصلي . ويسخن ما تبقى من العينة إلى درجة حرارة ٩٥٤° س في وعاء مغلق لمدة سبع دقائق وتوزن العينة في نهاية هذه المدة، فتكون نسبة الكتلة للمادة المتطايرة مساوية للنقص في الوزن مقسوماً على الوزن الأصلي ، وأخيراً يتم تسخين العينة إلى درجة حرارة ٧٣٢° س في بوتقة مفتوحة حتى تحترق تماماً ، ثم يتم بعد ذلك توزين ما تبقى من العينة، فتكون نسبة الرماد في العينة مساوية للوزن النهائي مقسوماً على الوزن الأصلي . ويمكن حساب نسبة الكربون الثابت في العينة بطرح نسب كل من الرطوبة والمادة المتطايرة والرماد من الواحد الصحيح . وبالإضافة إلى نسب الكربون الثابت والمادة المتطايرة والرطوبة والرماد فإن التحليل التقريبي يعطي أيضاً النسبة الكتلية للكبريت ( S ) والقيمة الحرارية العليا ( HHV ) للفحم بشكل منفصل .

٢ ـ التحليل النهائي : ( Ultimate analysis )

وهذا التحليل هو تحليل مخبري ويعطي نسب الكتلة لكل من الكربون ( C ) والهيدروجين ( $H_2$ ) والأكسجين ( $O_2$ ) والكبريت ( S ) والنيتروجين ( $N_2$ ) في الفحم مع القيمة الحرارية العليا للفحم . ومعظم التحليلات النهائية تبين نسب الرماد والرطوبة بشكل منفصل ولكن بعضها يدمج هذه النسب مع نسب الأكسجين والهيدروجين . تستعمل نتائج التحليل النهائي في حساب كمية الهواء المطلوبة لنظام احتراق معين وبالتالي تحديد حجم نظام السحب أو الشفط للفرن .

## خصائص الفحم الحجري :

هناك عدد من الخصائص أو الصفات التي يجب مراعاتها عند اختيار نوع معين من الفحم في تطبيق عملي معين أهمها :

### ١ ـ محتواه من الكبريت :

يعتبر الكبريت أحد العناصر القابلة للاحتراق في الفحم الحجري، وينتج عن احتراقه غاز ثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) الذي يعتبر أحد الملوثات الرئيسة للبيئة . وتعد عملية إزالة الكبريت من الفحم قبل حرقه عملية صعبة ومكلفة. كذلك فإن عملية إزالة ثاني أكسيد الكبريت من نواتج الاحتراق تعد هي الأخرى عملية صعبة، ولهذا فإنه من الضروري أن يكون المحتوى الكبريتي أقل ما يمكن ( ١ ٪ أو أقل ) .

### ٢ ـ خصائص احتراقه :

عند اختيار نوع من الفحم لنظام احتراق معين فإنه يجب مراعاة الكيفية التي يتم فيها إحراق هذا الفحم ، فإذا كان حرق الفحم يتم على فرش ثابت فإنه يجب استعمال فحم قابل للاحتراق الحر ( Free-burning coal ) وليس فحماً قابلاً للتكتل ( Caking coal )، لأن فحم الاحتراق الحر يميل للتبعثر والتناثر عند اشتعاله مما يؤدي إلى تعريض الفحم غير المشتعل لهواء الاحتراق فيؤدّي إلى تسهيل وتسريع عملية الاحتراق ، ولكن في حالة حرق الفحم القابل للتكتل فإن ذلك يؤدي إلى اندماج الفحم المحترق في كتلة واحدة وهذا بدوره يتسبب في عدم احتراق نسبة كبيرة من الكربون الثابت في الفحم ، ومثل هذا النوع من الفحم يستخدم عادة لإنتاج فحم الكوك ( Coke ) ، ولحرقه بكفاءة يستخدم فرش يمكن تحريكه أو هزّه ميكانيكياً لتحطيم وتكسير الفحم المتكتل .

### ٣ ـ مقاومته لظروف الطقس ( Weatherability ) :

تحدد هذه الخاصية مقدرة الفحم على مقاومة ظروف الطقس المتغيرة وذلك من خلال عدم حدوث تفتت زائد للفحم عند تعرضه لمثل هذه الظروف . في محطات التوليد الكبيرة التي تعمل بالفحم الحجري يتم تخزين الفحم في أكوام كبيرة بجانب هذه المحطات حيث انه عند وصول الفحم إلى أماكن التخزين هذه ـ بواسطة القطارات أو غيرها من وسائط النقل ـ فإنه يتم نشره على شكل طبقات رقيقة ورصّه بواسطة آلات ضخمة للتخلص من أكبر كمية ممكنة من الهواء الموجود في أكوام الفحم للتقليل من خطر حدوث الاشتعال الذاتي في هذه الأكوام. وإذا كان الفحم قابلاً للتفتت بسهولة فإن هذا يؤدي إلى تآكل أو تحاتّ الجزيئات الصغيرة بفعل العواصف المطرية مما يتسبب في خسائر مادية وفواقد طاقة كبيرة بالإضافة إلى تلوث المياه .

٤ ــ قابليته للطحن : ( Grindability )

يستخـدم الفحم المطحـون في الكثيـر من أنظمـة حـرق الفحم الحجـري خصوصاً أفران الفحم المسحوق حيث يتم طحن الفحم للحصول على مسحوق فائق النعومة بواسطة آلات طحن خاصة ( Pulverizers ) تتناقص قدرتها بازدياد قابلية الفحم للطحن .

٥ ــ درجة حرارة تلين الرماد : ( Ash-softening temperature )

هي درجة الحرارة التي يصبـح عندها رماد الفحم ذا درجة عالية من اللدانة ( Very plastic ) وهذه الدرجة تقل قليـلاً عن درجة حـرارة انصهار الـرماد . في الأفـران التي يتم التخلص من الرمـاد فيها على شكـل جُفـاء ( Slag ) مُنصهـر ، يُفضل أن يكون الرماد ذا درجـة حرارة تلين منخفضـة في حين يفضل استخـدام الرماد ذي درجة حرارة التلين المرتفعة في أنظمة الاحتراق التي تتعامل مـع الرماد كمادة صلبة .

٦ ــ القيمة ( المحتوى ) الحرارية : ( Heating value )

تُعد هذه الخاصية ذات أهمية كبيرة إذ انها تمثل مقـدار الطاقـة الكيميائيـة المختـزنة في كتلـة أو حجم معين من الوقـود ( الفحم )، وتقاس عـادة بـوحـدات الكيلوجول لكل كيلوغرام ( KJ / kg ) . هناك قيمتان حراريتان للفحم هما: القيمة الحـرارية العليـا أو الإجماليـة ( HHV ) والقيمة الحـرارية الـدنيا أو الصـافيـة (LHV)، والفرق بين القيمتين هو الحرارة الكامنة للتبخر الموجودة في بخار الماء المطـرود مـع الغازات العـادمة والنـاتـج عن عمليـة الاحتـراق بـالإضـافـة للمـاء ( الـرطوبـة ) المـوجـود في الفحم أصـلاً ( قبـل حـرقـه ) ويستثنى من ذلـك أي رطوبة قد تدخل مـع هواء الاحتراق .

وحيث ان الحرارة الكامنة لتبخر المـاء تبلـغ حوالى ٢٤٠٠ كيلـوجول / كغم فإنه يمكن حساب إحدى القيمتين من الأخرى بواسطة المعادلـة التقريبيـة ( يمكن استعمالها لأي وقود آخر غير الفحم ) الآتية :

$$HHV - LHV = 2400\,(M + 9H_2)\ KJ/kg \qquad (٧ - ١)$$

حيث ان (M) و ( $H_2$ ) همـا النسب الوزنيـة للـرطـوبـة والهيـدروجين في الوقود .

## ٣ ــ الغاز الطبيعي : ( Natural Gas )

يعتبر الغاز الطبيعي من أهم مصادر الوقود الغازي ويوجد في الطبيعة تحت سطح الأرض إما مختلطاً مع النفط أو منفرداً بالقرب من حقول النفط أو منفرداً بعيداً عن حقول النفط أو داخل طبقات الفحم الحجري في مكامن داخل الطبقات الصخرية. ويتراوح ضغط الغاز الطبيعي في مكامن وجوده ما بين ٣٥٠ ــ ٧٠٠ بار ( $1\ bar = 10^5\ N/m^2$ ) .

يتكون الغاز الطبيعي من خليط من المركبات الغازية ، أهمها : الميثان ( Methane $CH_4$ ) بنسبة تتراوح ما بين ٧٠ ــ ٩٥ ٪ ، والإيثان ( Ethane $C_2H_6$ ) بنسبة تصل إلى حوالى ١٢ ٪ ، والبروبان ( Propane $C_3H_8$ ) والبيوتان ( Butane $C_4H_{10}$ ) بنسب أقل .

للغاز الطبيعي عدة ميزات تجعل منه مصدراً هاماً من مصادر الطاقة من أبرزها :

١ ــ قيمته الحرارية العالية والبالغة حوالى ٥٥٨٠٠ كيلوجول / كغم ( ٣٧٠٠٠ كيلوجول / متر مكعب عند ضغط جوي ١ ودرجة حرارة ٢٠°س ).

٢ ــ سهولة حرقه واختلاطه مع الهواء بشكل جيد .

٣ ــ يعطي احتراقاً كاملاً ونظيفاً مع القليل من الرماد .

٤ ــ سهولة استعماله ونقله حيث يمكن إيصاله للبيوت في أنابيب لاستخدامه في إنتاج الطاقة الحرارية. كذلك بالإمكان نقله في أنابيب عبر البحار أو شحنه في ناقلات مبردة ( Cryogenic ) بعد إسالته وتحويله إلى غاز طبيعي مسال ( LNG ) عند درجة حرارة ــ ١٢٧°س ).

العيب الوحيد للغاز الطبيعي كمصدر للطاقة هو أنه من الصعب تخزينه بكميات كبيرة بحالته الغازية. وهناك بعض الشركات التي تقوم بحقن الغاز تحت ضغوط عالية في فجوات ضخمة تحت الأرض حيث يحل هذا الغاز محلَّ الماء الموجود في هذه الفجوات .

هناك عدد كبير من الغازات المصنعة ، منها : غاز النفط المسال

( Liquified petroleum gas, LPG ) ويطلق عليه أحياناً اسم غاز المصفاة . ويتكون هذا الغاز من المركبات الخفيفة الناتجة في برج تقطير النفط وهي البروبان ( Propane ) والبيوتان ( Butane ) بشكل أساسي . وهذا الغاز يعتبر ذا قيمة حرارية حجمية أعلى من القيمة الحرارية الحجمية للغاز الطبيعي وذلك لأن الوزن الجزيئي والكثافة له أكبر . وغاز النفط المسال له كثافة أكبر من تلك التي للهواء الجوي مما يزيد من خطورة مناولته بالمقارنة مع الغاز الطبيعي .

ويتم عادة نقل هذا الغاز وتخزينه تحت ضغوط تتراوح ما بين ٤ ــ ٢٠ بار وذلك حسب درجة حرارة الجو . ومن الغازات المصنعة أيضاً غاز الماء ( Water gas ) والذي يتم إنتاجه بتمرير كل من بخار الماء والهواء بالتناوب خلال فرش من فحم الكوك المتوهج حيث يتفاعل البخار مع فحم الكوك وينتج عن هذا التفاعل غاز الهيدروجين وغاز أول أكسيد الكربون .

وتضاف أحياناً أبخرة بعض الزيوت إلى غاز الماء لرفع قيمته الحرارية ويسمى غاز الوقود الناتج عن هذه العملية بغاز الماء الممزوج ( Carbureted water gas ) .

وهناك عدد من العمليات التحويلية التي يتم تطويرها لتصنيع وقود غازي ذي قيمة حرارية عالية من الفحم الحجري، وهذا الغاز يطلق عليه اسم الغاز الطبيعي المصنع ( Synthetic natural gas SNG ) . نظرياً ، فإن هذه العمليات تجعل من الممكن الاستفادة من الفحم الحجري ذي المحتوى العالي من الكبريت وذلك بتحويل معظم طاقته إلى وقود غازي رخيص ونظيف، ولكنه يلزم إضافة الهيدروجين إلى الفحم قبل عمليات التحويل هذه لأن المركبات الهيدروكربونية الصلبة الموجودة في الفحم تعتبر ذات نسبة هيدروجين / كربون منخفضة مقارنة مع هذه النسبة للوقود الغازي . وفي عملية الهدرجة ( Hydrogenation ) يتفاعل الهيدروجين عالي الضغط بدرجة حرارة ٩٠٠° س مع الفحم لإنتاج عدد من المركبات الهيدروكربونية الخفيفة خصوصاً الميثان .

ومن الغازات المصنعة كذلك غاز المنتج ( Producer gas ) ويتم تحضير هذا الغاز بحرق طبقات بعض أنواع الفحم الحجري ( من درجة واطئة Low-grade coal ) في الأرض أو في مواقع وجودها مع كمية غير كافية من الهواء إلى أن يحترق جميع الفحم تماماً .

وفي هذا الاحتراق تضـاف كمية من الهـواء تكفي فقط للمحافظـة على درجة حـرارة الاحتراق عنـد حد معين كـافٍ لسـحـب بعض الهيدروجين وأكسـدة بعض الكربون إلى أول أكسيد الكربون. وعلى الرغم من أن الوقود الغازي الناتـج عن هذه العملية ذو جودة منخفضة إلا أنه يعتبر استثماراً جيداً لهذه الطبقات الرديئة والقليلة السمـك من الفحم الحجري التي تعد عملية استخراجهـا غير مجـدية من النـاحية الاقتصادية .

وهنـاك غاز الفـرن العالي ( Blast-furnace gas ) منخفض الجـودة والذي هـو عبارة عن نـاتـج ثانـوي في عمليات تصنيـع الفـولاذ ، ويتم إنتاج هـذا الغاز بواسطة حرق الفحم في هواء غير كاف ثم يمرر الغاز المتولد فوق المعدن المنصهر لمنـع حـدوث تـأكسـد لهـذا المعـدن ( يكـون هـذا الغـاز عبـارة عن عـامـل مختزل Reducing agent ) .

وعلى الرغم من أن القيمة الحرارية لغاز الفرن العالي لا تتعدى عشر هذه القيمة للغاز الطبيعي فإنه يتم إنتاج كميات كبيرة منه في هذه الأفران بشكل اقتصادي .

ويتكون هذا الغاز بشكل أساسي من النيتروجين وأول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون، حيث ان أول أكسيد الكربون هو المكون الـوحيد القـابل لـلاحتراق في هذا الغاز .

وأخيراً هناك غـاز المجاري ( Sewage gas ) الـذي ينصب الاهتمام حـالياً على إنتـاجه بـالاستفادة من مخلفـات الحيوانـات والخضروات. ويتكـون هذا الغـاز أساساً من الميثان المتولد خلال عملية تحلل ( Decay ) المواد العضوية .

ازدادت أهمية الغاز الطبيعي كمصـدر للطاقـة حيث ازدادت نسبة مـا ساهم بـه هذا الغاز عام ١٩٥٠م من ١٢ ٪ من طاقة العالم الكلية إلى حوالى ١٩ ٪ عـام ١٩٨٠م .

يتراوح الاحتياطي العالمي المـؤكـد من الغاز الطبيعي حسب التقديرات في نهـايـة عـام ١٩٧٥م مـا بين ٥٨ × ١٠^١٢ – ٧١ × ١٠^١٢ متـر مكعب ، شكّـل الاحتياطي العربـي حوالى ١٦,٥ ٪ منه .

## ١ ـ ٦ ـ ٣ الطاقـة الجيوفيزيائيـة :

### ١ ــ الطاقـة المائيـة:

تشمل هذه الطاقة كلاً من الطاقة الكهرومائية وطاقة الأمواج، ويمكن الحصول على الطـاقة الكهـرومائيـة باستغـلال القوة الكـامنة في مسـاقط الميـاه الطبيعيـة ( الشلالات ) أو الصناعية مثل السدود ، وللطاقة المتوافرة من هذا المصـدر ميزات منها :

١ ــ إنها طاقـة متجددة وليست معـرضة للفنـاء طالمـا هناك أمطـار وثلوج تتساقط بانتظام .

٢ ــ إن الطاقة الكهربائية المتولدة من قوة اندفاع المياه تمتاز بما يلي :

( أ ) سهولة التحكم بها حسب الحاجة .

(ب) سرعة النقل والتوزيـع .

( ج) نظافتها المطلقة ( لا تلوث البيئة ) .

( د ) الكفاءة العالية في تحويلها من طاقة وضـع إلى طاقة كهربائية حيث تصل هذه الكفاءة إلى حوالى ٩٠ ٪ .

(هـ) المحطات الكهرومائية تعمر طويلاً ( يصل عمرها إلى ٢٠٠ سـنـة ) . وحـاجتها للصيـانة قليلـة وذلك لقلـة الأعطال في آلاتهـا ولا تحتاج لعـدد كبير من الأيدي العاملة للإشراف عليها وصيـانتها بـالإضافـة إلى أن هذه المحطـات تخدم أغراضاً أخرى غير إنتاج الطاقة الكهربائية مثل توفيـر مياه الـري والمياه الـلازمة لتربية الأسماك .

وهناك سيئات منها :

( أ ) تكاليف الإنشاء الباهظة ( السدود وخطوط نقل الكهرباء ... ) .

(ب) الكهرباء غير قابلة للتخزين بشكل اقتصادي .

( ج ) لا يمكن نقل الكهرباء مسافة تزيد عن ١٠٠٠ كم بشكل اقتصادي .

أمـا طاقـة الأمواج، فهي غيـر مستغلـة وهنـاك بعض البحـوث والمقتـرحـات لاستـغـلال هـذه الطـاقـة ، حيـث جـرى استخـدام فكـرتيـن : الأولـى

تستخدم الحركة الرأسية للأمواج وتسمى بالأنبوب الغاطس، حيث يتم استخدام أنبوب يغطس ٧٥ ٪ من طوله في الماء وهناك صمامات تسمح بإدخال الماء من أسفل الأنبوب ثم تغلق، وخلال حركة الماء للأعلى في الأنبوب يمر خلال توربينات تولد الطاقة الكهربائية ثم يخرج الماء من فتحة تكون خارج سطح الماء وتعتمد قوة سير الماء وبالتالي الطاقة الكهربائية المتولدة على قوة الأمواج . أما الفكرة الثانية فإنها تستغل حركة الاهتزاز التي تولدها الأمواج باستخدام نوع من البندول أو العوامة حيث يستفاد من الحركة الترددية للذراع المتصلة بهذه العوامة وذلك بتحويلها إلى شكل مفيد من أشكال الطاقة . وتقدر الطاقة التي يمكن أن تولدها الأمواج في العالم بحوالى ٦ × ١٠^١٠ واط .

وهناك أيضاً طريقة أخرى للحصول على الطاقة الكهربائية بشكل غير مباشر من مياه المحيطات، وذلك بالاستفادة من الاختلاف في درجات الحرارة على أعماق مختلفة في هذه المحيطات حيث انه بالإمكان توليد القدرة بالاستفادة من الحرارة المتوافرة في الطبقات السطحية لمياه المحيط ( المصدر الساخن ) وطرد الحرارة إلى الطبقات الباردة نسبياً في الأسفل ( المصب البرد ) .

ويطلق على هذا المصدر المتجدد للطاقة، اسم طاقة المحيط الحرارية ( Ocean Thermal Energy OTE ) .

٢ ـ طاقة الريح : ( **Wind energy** )

استطاع الإنسان تسخير طاقة الريح منذ أمد بعيد لأغراض مختلفة وقد جرى استخدامها في البحر لتسيير السفن وفي البر لتشغيل الطواحين الهوائية .

تنشأ حركة الريح من تأثير مزدوج لتسخين أشعة الشمس ودوران الأرض حول نفسها . وتتوافر الطاقة في الريح على شكل طاقة حركة

$$KE = \frac{1}{2} mV^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \, J \qquad (١ - ٨)$$

حيث :

KE : طاقة الحركة للرياح ( J )

m : كتلة الرياح ( kg )

V : سرعة الريح ( m / s )

ρ : كثافة الهواء ( $kg / m^3$ )

A : المساحة التي تتحرك فيها شفرات المروحة الهوائية ( Swept area $m^2$ )

على الرغم من أن الطاقة الكامنة في الريح عظيمة إلّا أن هناك سلبيات كثيرة تمنع استغلالها على نطاق واسع أهمها :

١ ـــ التذبذب الكبير في سرعة الرياح مما يؤثر على التوربين( الطاحونة الهوائية ) .

٢ ـــ تتصف هذه الطاقة بعدم الديمومة في معظم المناطق .

٣ ـــ لكون كثافة الهواء قليلة فإن هذا يعني أن الطاقة المتوافرة في حجم معين من الهواء قليلة ويتطلب ذلك معدات ذات مساحة وحجم كبيرين لاستخلاص هذه الطاقة .

وتقدر الطاقة المتوافرة في الرياح في العالم بحوالى ٩٧٠ × ١٠^١٠ واط .

٣ ـــ الطاقة الشمسية : ( Solar energy )

تعتبر الطاقة الشمسية مصدر كل الطاقات التقليدية المعروفة ( باستثناء الطاقة النووية ) وهي مصدر لا ينضب للطاقة ، وتستقبل الأرض من الشمس كمية من الطاقة مقدارها ١٠^١٨ كيلواط ـــ ساعة في العام. وهذه الكمية تساوي ألف ضعف احتياطي البترول في العالم. في الوقت الحاضر لا يتم استغلال هذه الطاقة كمصدر أساسي من مصادر الطاقة إلا أن هناك بحوثاً متزايدة للتوسع في استغلالها خصوصاً في توليد الطاقة الميكانيكية. والمشاكل الرئيسة التي تعترض استغلال الطاقة الشمسية بشكل واسع تتلخص فيما يلي :

١ ـــ تعتبر مصدراً متقطعاً للطاقة على المدى اليومي ( ليل ـــ نهار ) وعلى المدى الفصلي ( صيف ـــ شتاء )

٢ ـــ نظراً لانخفاض شدة الإشعاع الشمسي فإن هذا يتطلب لواقط ومجمعات شمسية ذات مساحات وأحجام كبيرة مما يزيد من التكاليف .

٣ ـــ يحتاج استغلالها إلى تكنولوجيا متقدمة لا تتوافر للدول كافة.

٤ ــ صعوبة تخزين الطاقة الشمسية .

ولكن الميزات العديدة لهذا المصدر من الطاقة يجعلها من المصادر المرغوبة، ومن أهم هذه الميزات:

١ ــ تشكل الطاقة الشمسية مصدراً هائلاً للطاقة المتجددة .

٢ ــ يمكن الاعتماد عليها بسبب ديمومتها واستمراريتها .

٣ ــ مصدر مجاني للطاقة .

٤ ــ مصدر طاقة نقي ونظيف أي أنها لا تلوث البيئة .

٥ ــ إمكانية تحويلها إلى أشكال أخرى للطاقة بسهولة .

٦ ــ تشكل مصدراً مستقلاً للطاقة وليست بحاجة للاستيراد من بلد آخر .

### ١ ـ ٦ ـ ٤ الطاقة الحرارية الجوفية : ( Geothermal energy )

توجد هذه الطاقة على شكل تراكمات طبيعية من بخار الماء والماء الحار والصخور الجافة الحارة .

هناك انتقال حرارة طبيعي من قلب الكرة الأرضية المنصهر إلى سطح الكرة الأرضية عبر طبقات الأرض المختلفة، وفعلياً فإن جميع هذه الحرارة تنتقل بالتوصيل ، ( Conduction ) وفي بعض الأماكن فإن كميات محدودة من الماء أو البخار تنساب إلى سطح الأرض عبر شقوق أو صدوع في طبقات الأرض على شكل نوافير غازية ( Fumaroles ) أو نوافير حارة ( Geysers ) أو ينابيع حارة ( Hot springs ) وثورات بركانية، ولكن مثل هذه الأماكن نادرة الوجود ولهذا فإنه لا بد من حفر الآبار في أغلب الأحيان لاستغلال الطاقة الحرارية الجوفية .

يبلغ الانحدار الطبيعي لدرجة الحرارة ( Normal temperature gradient ) في التركيب الصخري للأرض حوالي ٢٩° س / كيلومتر ( 29C°/ Km ) وانحدار بهذا المقدار يعتبر غير كافٍ للاستغلال العملي للطاقة الداخلية للأرض. وفي بعض الأماكن يصل هذا الانحدار في درجة الحرارة إلى أكثر من ١١٠° س / كيلومتر ( 110C°/ Km ) مما يجعل من الممكن استغلال الطاقة الحرارية في هذه الأماكن . الشكلان الأساسيان للطاقة الحرارية الجوفية

هما الماء الحار والصخور الحارة الجافة ( Hot dry rock ) وفي بعض الأماكن تسود الحالة البخارية في منطقة الماء الحار ويعرف مصدر الطاقة في هذه الحالة بالمصدر البخاري ( Steam ) وإذا كان الماء الحار للمصدر كاملاً في حالته السائلة ، فإن المصدر يسمى بالمصدر الحراري المائي الجوفي ( Geohydrothermal ) .

تم استغلال الطاقة الحرارية الجوفية منذ فترة طويلة في مناطق مختلفة من العالم كما هو الحال في لارديرلو ( Larderello ) في إيطاليا حيث حفر هناك بئر لاستغلال البخار الجوفي عام ١٩٠٤م تصل قدرته الكهربائية إلى ٣٧٠ ميغاواط ( 370 MWe ) . يبين الشكل ( ١ ـ ٧ ) رسماً تخطيطياً لنظام طاقة حرارية جوفية .

يعتبر بعض المختصين الطاقة الحرارية الجوفية طاقة ملوِّثة إلى حد ما حيث ان بعض المصادر تطلق غازات ذات نشاط إشعاعي بالإضافة إلى غاز سولفيد الهيدروجين ( $H_2S$ ) الذي هو غاز سام .

وهناك مشكلة أخرى مصاحبة لاستغلال الطاقة الحرارية الجوفية وهي مشكلة التلوث الحراري ( Thermal pollution ) الناتج عن ضخ كميات كبيرة من الطاقة الحرارية للبيئة مما يخل بالتوازن البيئي كما سنرى فيما بعد .

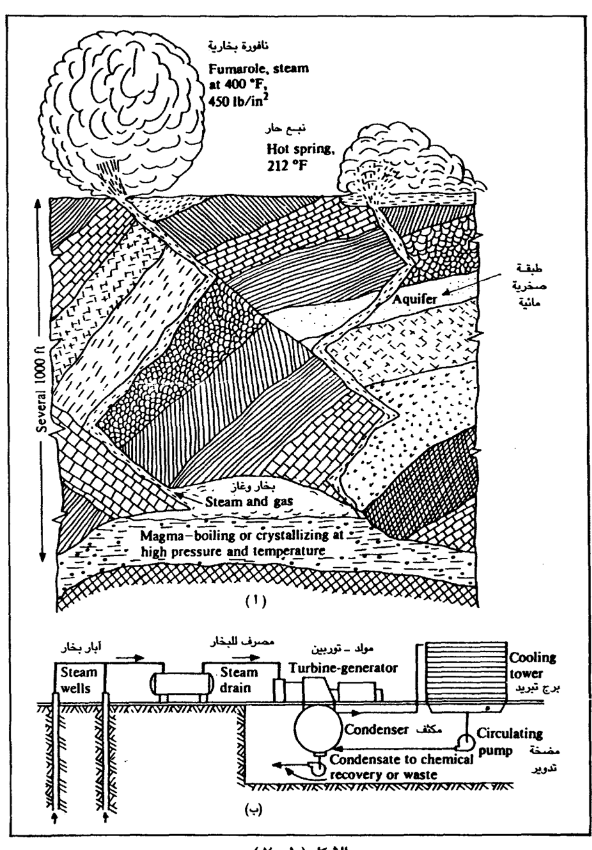
ومن المشاكل الهامة أيضاً لهذا المصدر هي احتمال هبوط الأرض وتصدعها وزيادة النشاط الزلزالي في منطقة استغلال الطاقة الجوفية .

تقدر الطاقة الحرارية الجوفية الكلية التي يمكن استغلالها في العالم بحوالى $٤ \times ١٠^{٢٠}$ جول .

## ١ ـ ٦ ـ ٥ الطاقة النووية : ( Nuclear energy )

تعتبر الطاقة النووية المصدر الوحيد من مصادر الطاقة التقليدية التي ليس مصدرها الأساسي الطاقة الشمسية، ويرجع تاريخ اكتشافها إلى أربعة عقود مضت، وتعد مصدراً هائلاً للطاقة إذا تم استغلاله بشكل واسع حيث ان مقدار الطاقة المتولدة من التفاعلات النووية يعطي بمعادلة اينشتاين:

$$E = m c^2 \text{ J} \qquad (١ ـ ٩)$$




**الشكل ( ١ ـ ٧ )**

**رسم تخطيطي لتراكم حراري جوفي طبيعي ومحطة قدرة نموذجيين**

حيث ان :

E : الطاقة المتولدة ( J )

m : الكتلة الفعلية المتحولة إلى طاقة( kg )

C : سرعة الضوء ( $3 \times 10^8$ m / s )

هناك ثلاثة أنواع من التفاعلات النووية المعروفة وهي :

**١ ــ التحلل الإشعاعي (الإضمحلال ) :**

هنا يتحول النظير المشع عبر فترة زمنية طويلة إلى عناصر أخرى أكثر ثباتاً وتنطلق خلال هذه العملية جسيمات α ( الفا ) و ß ( بيتا ) وأشعة γ ( جاما ) .

**٢ ــ الانشطار النووي :**

وفيه يتم انشطار نواة الذرة إلى نواتين أو أكثر أخف وزناً والفرق في الكتلة يتحول لطاقة حسب معادلة اينشتاين كما هو الحال في القنبلة الذرية. ومن الأمثلة على هذا النوع من التفاعل هو انشطار نظير اليورانيوم ٢٣٥ عند قذفه بنيوترون إلى نواتين لعنصرين جديدين هما الباريوم ( Ba ) والكربتون ( Kr ) ويكون مجموع الكتلتين الجديدتين أقل من الكتلة الأصلية .

$$U_{92}^{235} + n_0^1 \rightarrow U_{92}^{236} \rightarrow Ba_{56}^{141} + kr_{36}^{92} + 3n_0^1 + \text{Energy}$$

**٣ ــ الاندماج النووي :**

في هذا التفاعل تندمج عدة أنوية خفيفة لتشكل نواة واحدة أخف وزناً والفرق في الكتلة يتحول لطاقة. ومن الأمثلة على هذا التفاعل هو اندماج نواتين من الديتيريوم ( Deuterium ) ( هيدروجين ــ 2 ) أو الهيدروجين الثقيل $H_1^2$ لتكوين ذرة هيليوم He ونيوترون n . ويحتاج هذا التفاعل (الاندماج) ــ لكي يتم ــ درجة حرارة مقدارها ٥,٨ × ١٠^٨ كلفن .

$$H_1^2 + H_1^2 \rightarrow He_2^3 + n_0^2 + \text{Energy}$$

وتعد القنبلة الهيدروجينية تطبيقاً لهذا النوع من التفاعلات الاندماجية.

هناك عدة ميزات للاندماج النووي مقارنة بالانشطار النووي :

( أ ) هناك احتياطات أكبر في العالم من النظائر القابلة للاندماج ( وقود الاندماج النووي ) من احتياطات وقود الانشطار النووي.

فالهيدروجين الثقيل ( Hydrogen - 2 ) أو الديتيريوم يوجد في الطبيعة بنسبة ١ / ٦٧٠٠ من الهيدروجين العادي .

(ب) ان نواتج الاندماج النووي ليست ذات مستويات إشعاعية كنواتج الانشطار النووي فهي ذات إشعاعية أقل ولذلك فإنها أقل خطراً على البيئة والناس .

( ج ) إن الاندماج النووي هو تفاعل يحتاج إلى عملية بدء غاية في الصعوبة وكذلك فإنه من الصعب أيضاً إبقاءه مستمراً ولهذا فإن أي تغيير بسيط في ظروف التفاعل يوقفه رأساً مما يعمل على منع حدوث خطر في حالة حدوث خلل فني في المفاعل النووي .

( د ) إن الطاقة المتولدة من الاندماج النووي أكبر منها بكثير في حالة الانشطار النووي .

وبشكل عام فإن هناك عدة مشاكل تعترض استخدام الطاقة النووية بشكل واسع منها :

( أ ) التكاليف الباهظة لإنشاء المحطات والمفاعلات النووية .

(ب) الحاجة إلى توافر الخبرة الفنية العالية والمدربة .

( ج ) مخاطر الحوادث وتلوث البيئة ومشكلة التخلص من النفايات النووية .

( د ) صعوبة الحصول على الوقود الذري ( في حالة الانشطارالنووي فإن الوقود هو اليورانيوم المُشع ) .

يقدر احتياطي العالم من نظير اليورانيوم $U_{92}^{235}$ بحوالي ١٣,٧ × ١٠^٢١ جول ومن نظير اليورانيوم $U_{92}^{238}$ بحوالى ١٨٠٠ × ١٠^٢١ جول ومن الديتيريوم ( $H_1^2$ ) أو الهيدروجين الثقيل بحوالى ٦٠٠٦١ × ١٠^٢٣ جول وهناك احتياطات أخرى هائلة من عناصر مشعة أخرى .

## ١ ـ ٦ ـ ٦ طاقة المد والجزر : ( Tidal energy )

تُعطى حركة المـد والجزر في المحيطـات كمية كبيـرة جداً من طـاقة الحـركة التي يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية بواسطة توربينات مائيـة . وتعد طـاقة المـد والجزر إحدى مصادر الطاقة القادمة من خارج نطاق الكرة الأرضيـة إذ انهـا تعود بشكل أساسي إلى قوة جذب القمر للأرض، حيث تؤثر هذه القوة القمرية على المحيطات وتتسبب في السريانات المدية باتجاه الشواطيء والتي يتراوح ارتفاعهـا من أجزاء من المتر إلى ثمانية أو تسعة أمتار . إن استغلال هذا المصدر من الطاقة ليس من الأمور السهلة وذلك للأسباب التالية :

١ ــ يتطلب بناء محطة كهربائية وصول مياه المد إلى ارتفـاع عشرة أمتـار وهذا لا يتوافر إلّا في عدد محدود من خلجان العالم .

٢ ــ التذبذب الكبير في مستوى مياه المد العالي .

٣ ــ اتجـاه حركتي المـد والجزر المتعـاكستين مما يؤدي إلى صعـوبة في تصميم التوربينات .

٤ ــ صعوبة بناء المحطات المدية بسبب الصعوبات الجغرافية والطبيعية .

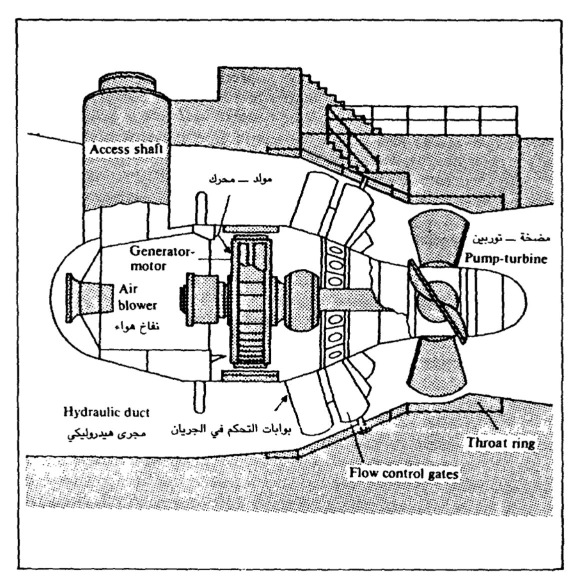
٥ ــ انخفاض معدل التشغيل السنوي لهذه المحطات .

على الرغم من أن استغلال طاقة المد والجزر على نطاق واسـع لا يقدم حلّاً لمشكلة احتياجات العالم من الطـاقة فـإن هذا المصـدر يعد من المصـادر الهامـة والمرغوبة لكون طاقة المد والجزر طاقة متجـددة ( غير قـابلة للفنـاء ) وغير ملـوثة للبيئة .

ومن أهم المحطات المدّية في العالم تلـك التي بناهـا الفرنسيـون عند مصب نهر رانس، وتعمل هذه المحطة أربعـاً وعشرين سـاعة في اليـوم وتولـد ما مقـداره ٢٤٠ ميغاواط من الكهرباء ، أي ما يعـادل حوالى ٤ ٪ من الطـاقة الكهـربائيـة في فرنسا .

وتقدر القدرة الموجودة في حركة المد والجزر في العالم بحوالى ٨ × ١٠^١٢ كيلوواط .

يبين الشكـل ( ١ ـ ٩ ) إحـدى الـوحـدات الانعكـاسيـة ( تعمـل كتـوربين أو مضخة ) المستخدمة في المحطة المدّية على نهر رانس بفرنسا .




**الشكل ( ١ ـ ٩ )**
**إحدى وحدات ( توربين ــ مضخة ) المستخدمة**
**في محطة رانس المدية لتوليد الطاقة الكهربائية**

## ١ ـ ٦ ـ ٦ ـ ١ عمل محطات الطاقة المدّية :
## (Tidal power plant operation)

في محطة الطاقة المدية يتم تحويل طاقة الوضع للماء إلى طاقة ميكانيكية ( تتحول إلى طاقة كهربائية ) خلال مرور الماء في توربينات مائية معدّة لهذه المحطات .

ويعتمد عمل المحطة المدّية على بناء حاجز ( Barrier ) لتخـزين مياه المـد في حـوض ( Basin ) خلف هذا الحـاجز عنـد حدوث المـد وتفريغـه عند حـدوث الجزر .

ويتم توليد الطاقة الكهربائية عند مرور الماء عبر توربينات خلال حركتي المد والجزر إلى الحوض ، ويمتلىء الحـوض ويفرغ من المـاء خلال دورة مـدية كـاملة يستغرق حدوثها ١٢ ساعة و ٢٥,٥ دقيقة .

حجم الماء الداخل للحوض خلال حركة المد

$$V = A \triangle Z \quad (١ - ١٠)$$

حيث :

A : مساحة الحوض المتوسطة ( $m^2$ )

$\triangle Z$ : ارتفاع مياه المد ( m )

حجم الماء المتدفق عبر التوربين في دورة مدّية كاملة ( مدّ + جزر )

$$V_{cycle} = 2 A \triangle Z \quad (١ - ١١)$$

معدل تدفق الماء $\dot{m}$ ( kg/s )

$$m = \frac{2 \rho A \triangle Z}{\tau} \quad (١ - ١٢)$$

حيث :

$\rho$ : كثافة الماء ( $kg/m^3$ )

$\tau$ : زمن الدورة المدية الكاملة ( $\tau_{cycle} = 12.425$ hours )

ويؤخـذ العلو المتـوسط العامـل على التـوربين مسـاو لـ ( $\triangle Z/2$ ) ، أمـا القـدرة النظـريـة القصـوى المـعـدّلـة ( Theoratical maximum average power ) المتولدة في المحطة المدّية فتعطى بالمعادلة :

$$P_{max} = \frac{\rho A g (\triangle Z)^2}{\tau} \quad (١ - ١٣)$$

ولكن القدرة الفعلية المتولدة من المحطات المدّية تكون أقل بكثير من القدرة النظرية القصوى، ويعود ذلك أساساً إلى أن العلو الفعّال العامل يكون أقل من العلو المتوسط ( $\Delta Z/2$ ) ولهذا فـإن التوربينـات المّديـة تصمم لكي تكون قـادرة على العمل بفعالية تحت قيم منخفضة لعلو الماء .

ويتم عادة حساب القدرة السنويـة المعدّلـة القصوى ( Annual average maximum power ) للمحطـة المدّية وذلك بـالتعـويض عن $\Delta Z$ في المعـادلـة ( ١ ـ ١٣ ) بقيمتها السنوية المتوسطة . أما القـدرة الفعلية المعـدّلة المتـولدة من المحطة المديّة فتكون عبارة عن حاصـل ضرب القـدرة القصوى المعـدلة ومعـامل التشغيـل السنوي للمحطـة والذي تبلـغ قيمتـه حـوالى ( 0. 11 ) للمحطـات ذات التأثير المفرد ( Single - effect operation ) وحوالى ( 0. 13 ) للمحطـات ذات التأثير الثنائي ( Double - acting operation ) أي المحطات التي تـولد القـدرة في حركتي المدّ والجزر .

**مثـــال :**

تبلـغ المساحة المتوسطة لحوض محطة مدية ٧٠ سم٢ ومعدل ارتفاع ميـاه المد السنوي ١٠ م ومعامل التشغيل السنوي للمحطة ٠,١٢ ، احسب معدل إنتاج القدرة السنوي لهذه المحطة .

$P_{max}$ القدرة النظرية القصوى

$$P_{max} = \frac{\rho A g (\Delta Z)^2}{\tau}$$

$$= \frac{1025 ( 70 \times 10^6 ) 9.81 \times ( 10 )^2}{12.425}$$

$$= 5.665 \times 10^{12} \text{ J/h}$$ ( جول / ساعة )

$$= 5.665 \times 10^{12} \frac{J}{h} \times \frac{1}{3600} \frac{h}{s} \times 10^{-6}$$

$$= 1573.6 \text{ MW}$$ ( ميغاواط )

القدرة الفعلية المعدّلة $P_a$

$$P_a = f\,P_{max}$$

$$= 0.12 \times 1573.6 = 188.8\ \text{MW}$$

• • •

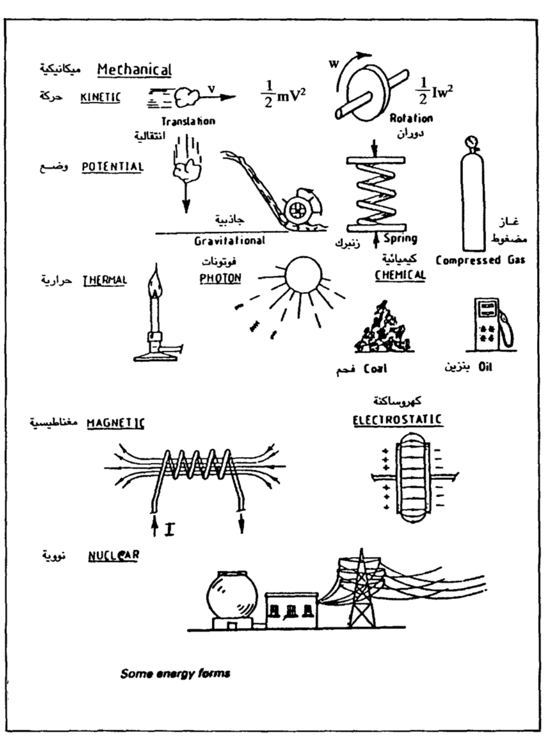
# الفصل الثاني

# مباديء تحويل الطاقة

# ٢ ـ ١
# اعتبارات عامة في تحويل الطاقة

واحـد من الأمثلة السهلـة على الطاقـة هو الجهـد المطلوب لـرفـع كتلة من مستوى منخفض إلى مستوى أعلى . ولعمـل ذلك ، فـإنه من الضـروري استخدام قوة أكبر بقليل من القوة المؤثـرة إلى أسفل على هـذه الكتلة ( قـوة الجاذبيـة ) ، فالشغل المبذول في رفـع هذا الجسم يساوي الكسب أو الزيادة في طاقة الـوضـع لهـذا الجسم في مجال الجـاذبية الأرضيـة . ويمكن استعـادة هـذا الشغـل بتـرك الجسم يسقط من المستوى العالي إلى المستوى المنخفض . ومن الأمثلة الأخرى لطاقة الوضـع، طاقـة المرونـة المختزلـة في زنبرك عنـد شده أو انضغـاطه . ومن الأشكال الأخرى للطاقة الميكانيكية طاقة الحركة .

وتعرف الطاقة بأنها القابلية لعمل أو إنجاز شغل . يبين الشكل ( ٢ ـ ١ ) أشكالاً متعددة للطاقة .



Some energy forms

الشكل ( ٢ ـ ١ )
بعض أشكال الطاقة

## ٢ ـ ٢

## مبدأ حفظ الطاقة
## القانون الأول في الثيرموديناميك

ينص مبدأ حفظ الطاقة ( القانون الأول في الثيرموديناميك ) . على أن مجموع الطاقات من كافة الأشكال في نظام مغلق يبقى ثابتاً .

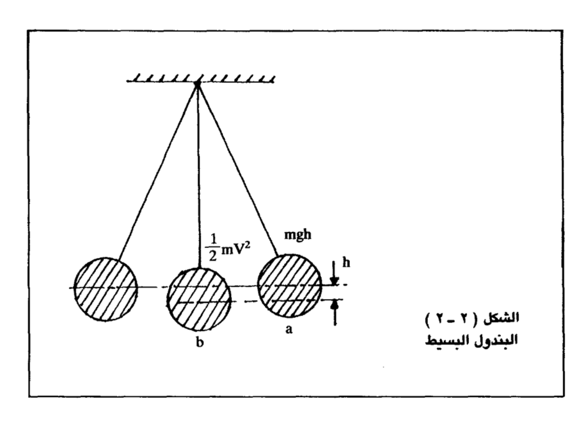
فإذا حدثت عملية في نظام مغلق أدّت إلى زيادة في أحد أشكال الطاقة ، فإن هذا يعني أن أشكالاً أخرى للطاقة في النظام سوف تنقص أو تقل بنفس المقدار .

**مثال :**
في حالة البندول البسيط المبين في الشكل ( ٢ ـ ٢ ) ، فإن طاقة الوضع تكون أكبر ما يمكن في الوضع ( a ) وتساوي ( mgh ) ، وتكون طاقة الحركة في هذا الوضع صفراً . وعند تحرك البندول باتجاه الوضع ( b ) ، تزداد طاقة الحركة تدريجياً على حساب النقصان في طاقة الوضع بحيث يبقى مجموعهما ثابتاً ، وعند الوضع ( b ) يصل البندول إلى أقصى سرعة له ، وتصبح طاقة حركته ( $\frac{1}{2}m\,V^2$ ) وطاقة وضعه صفراً . وهكذا يتم تبادل أشكال الطاقة في هذا النظام .

وفي الديناميكا الحرارية ( الثيرموديناميك ) ، فإن القانون الأول ينص على ما يلي :

عندما يُنفّذ النظام عملية مغلقة ، فإن الشغل المنجز يتناسب مع كمية الحرارة المنتقلة .

يفسر القانون الأول طبيعة العلاقة بين الحرارة المنتقلة والشغل المنجز في



الشكل ( ٢ ـ ٢ )
البندول البسيط

آلة تعمل على دورة ثيرموديناميكية مغلقة ، ورياضياً ، فإن هـذا القانـون يُكتب على النحو الآتي :

$$\Delta U = Q - W \quad (٢ - ١)$$

حـيـث :

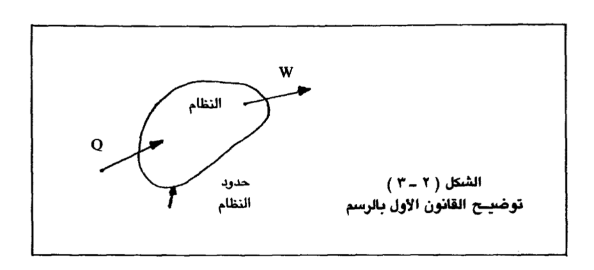
$\Delta U$ : التغير في الطاقة الداخلية للنظام ( J ) .

W : الشغل الذي ينجزه النظام ( J ) .

Q : الحرارة المنتقلة عبر حدود النظام ( J ) .

يبين الشكل ( ٢ ـ ٣ ) توضيحاً بالرسم للقانون الأول .

إن القانون الأول يبين لنا بأن الشغل الموجب الذيتنتجه آلة تعمل على دورة ثيرموديناميكية يـزداد مـع زيادة الحـرارة المنتقلة من المحيط الخـارجي ( حرارة موجبة ) ، وتعرّف الكفاءة الحرارية لهذه الآلة بـأنها مقـدار الشغل المـوجب الذي ينجـزه النظام مقسـوماً على الحـرارة المضافـة ـــ عبر حـدود هذا النظـام ـــ من المصدر الخارجي :




الشكل ( ٢ ـ ٣ )
توضيح القانون الأول بالرسم

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{Q_a} \qquad (٢ـ٢)$$

وهكذا نجد أن القانون الأول يحدد مقدار الشغل ( الطاقة المفيدة ) الذي يمكن الحصول عليه من مصدر الطاقة الخارجي المتوافر: كطاقة الوقود الكيميائية ( فحم ، بترول ... ) أو طاقة الماء أو طاقة الريح .

## ٢ ـ ٢ ـ١ تطبيقات على القانون الأول :

يبين الشكل ( ٢ ـ ٤ ) نظاماً ثيرموديناميكياً بسيطاً ومعزولاً ( $Q = 0$ ) يتم فيه نقل الطاقة ( تحويل الطاقة ) بواسطة الشغل ، حيث يتم إنجاز الشغل عند تحرك المكبس مسافة مقدارها ( $ds$ ) ، ويعطي هذا الشغل بالمعادلة الآتية :

$$dW = p\,A\,ds \qquad (٢ـ٣)$$

حيث :

$dW$ : كمية الشغل التفاضلية المنجزة ( J ) .

$A$ : مساحة المكبس ( $m^2$ ) .

$ds$ : المسافة التفاضلية التي يتحركها المكبس ( m ) .

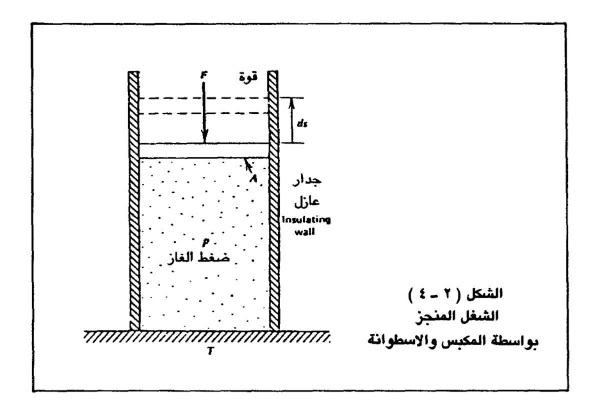
$p$ : ضغط الغاز في الأسطوانة, $P = F / A$ , ( $N / m^2$ ) .

ويمكن كتابة المعادلة ( ٢ ـ ٣ ) بالطريقة الآتية :

$$dW = p\ d\ V \qquad (٢ ـ ٤)$$

حـيـث :

dV : الحجم المزاح التفاضلي ( $m^3$ ) .




الشكل ( ٢ ـ ٤ )
الشغل المنجز
بواسطة المكبس والاسطوانة

وفي حـالـة التغيـر المحـدد من حجم ابتـدائي ( $V_1$ ) إلى حجم نهـائي ( $V_2$ ) ، فإن كمية الشغل المنجز :

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P(V)\, d\, V \qquad (٢ ـ ٥)$$

حيث انه بالإمكان إيجاد قيمة ( W ) مـن المعادلـة ( ٢ ـ ٥ ) إذا تم تحـديـد العلاقة بين الضغط ( P ) والحجم ( V ) .ويكون الشغل المنجز موجباً ( الشغل المنجز

بواسطة النظام ) إذا كان ( $V_2 > V_1$ ) ويكون الشغل سالباً ( الشغل مبذول على النظام ) ، إذا كان ( $V_1 > V_2$ ) .

**مثـــال :**

افترض أن ( $p = K / V$ ) احسب قيمة ( W ) من المعادلة ( ٢ ـ ٥ ) عند تحرك المكبس من الحجم ( $V_1$ ) إلى الحجم ( $V_2$ ) .

$$W = \int_{V_1}^{V_2} \frac{K}{V} \, dV$$

$$W = k \ Ln \ V \Big]_{V_1}^{V_2} = k \ Ln \ \left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

لاحظ أن اللوغاريتم الطبيعي( Ln ) لعدد أقل من ١ يكون سالبـاً ، مما يعني أنه في حاله كون ( $V_2 < V_1$ ) ، فإن الشغل المنجز يكون سالباً .

**مثـــال :**

في الشكل ( ٢ ـ ٤ ) ، قطر المكبس هـو ١٠ سم ، فإذا تحـرك هذا المكبس مسـافة ٤ سم ، فمـا هو مقـدار التغير في حجم الاسطـوانة ؟ إذا كـانت الإزاحـة الحاصلة تعود لتأثير قوة خارجية مقدارها ١٠٠٠٠ نيـوتن ، فما هـو مقدار الشغـل المنجز ؟ وما هو مقدار الضغط داخل الاسطوانة ؟

$$\Delta V = V_2 - V_1 = A \ \Delta s$$

$$= \frac{\pi \times 10^2}{4} cm^2 \times 4 \ cm$$

$$= 314.2 \ cm^2$$

$$= 3.142 \times 10^{-4} m^3$$

$$W = F . \Delta s = 10^4 \times 0.04 = 4 \times 10^2 \ J$$

$$W = p\Delta V \, , \; P = \frac{W}{\Delta V}$$

$$P = \frac{4 \times 10^2}{3.142 \times 10^{-4}}$$

$$= 1.3 \times 10^6 \ N/m^2$$

أيضاً : $P = \frac{F}{A}$

$$P = \frac{10^4}{\frac{\pi (0.1)^2}{4}}$$

$$= 1.3 \times 10^6 \ N/m^2$$

**مثـــال :**

في نظام ثيرموديناميكي كـانت كمية الحـرارة المنتقلة من المحيط الخـارجي إلى النظـام ( 40 KJ ) ، والشغل الـذي ينجزه النظـام هو ( 45000 J ) . احسب مقدار الزيادة في الطاقة الداخلية للنظام . وفي إجراء آخر بين نفس الحالتين الابتدائية والنهائية للنظام ، أنجز النظام شغلاً يسـاوي ( 35000 J ) . احسب مقدار واتجـاه ( إشارة ) الحرارة المنتقلة خلال هذا الإجراء الجديد .

بتطبيق القانون الأول $\Delta E = E_2 - E_1 = Q - W$

تقل الطاقة الداخلية للنظام بمقدار : $\Delta E = 40000 - 45000 = -5000 \ J$

خـلال الإجـراء الجـديـد ، $\Delta E \text{ constant} = -5000J$

تنتقل الحرارة باتجاه موجب $-5000 - Q = 35000$

من المحيط الخارجي إلى النظام . $Q = +30000 \ J = +30 \ KJ$

## ٢ ـ ٢ ـ ٢ الطاقة الداخلية : ( Internal energy )

من الممكن بناء نظام ثيرموديناميكي تام العزل ، بحيث يتم الانضغاط من دون حدوث أي تبادل حراري عبر حدود هذا النظام ، والإجراء الذي يتم من دون انتقال للحرارة ( $Q = 0$ ) في مثل هذا النظام يسمى بالإجراء الأديابتيكي . ومن الخصائص الهامة لهذا الإجراء أن الشغل المنجز خلال هذا الإجراء يعتمد فقط على نقاط البداية والنهاية للإجراء، وليس على المسار (path) الذي يتخذه الإجراء.

يمكن كتابة المعادلة ( ٢ ـ ١ ) بصيغتها التفاضلية ( Differential form ) على النحو :

$$dQ = dU + dW \qquad (٢ - ٦)$$

وللإجراء الأديابتيكي ( $dQ = 0$ ) ، فإن هذه المعادلة تصبح :

$$W = -\int_{U_1}^{U_2} dU = U_1 - U_2 \qquad (٢ - ٧)$$

وهكذا ، فإن مقدار الشغل المنجز في الإجراء الأديابتيكي يعتمد فقط على قيم الطاقة الداخلية الابتدائية ( $U_1$ ) والنهائية ( $U_2$ ) ، وليس هناك ضرورة لمعرفة مسار الإجراء كما هو واضح من المعادلة ( ٢ ـ ٧ ) .

في الإجراء الذي يبقى فيه الحجم ثابتاً ( ثبات الحجم ) ، فإنه يمكن كتابة القانون الأول على النحو :

$$dQ = dU \; ( dV = 0 ) \qquad (٢ - ٨)$$

وبقسمة طرفي المعادلة على ( dT )

$$\frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} \; ( dV = 0 ) \qquad (٢ - ٩)$$

ولكن القيمة ( $dQ / dT$ ) هي تعريف السعة الحرارية ، وبما أن الحجم يبقى ثابتاً فإن هذه السعة ، هي السعة الحرارية عند ثبات الحجم ( $C_V$ ) .

$$\frac{dQ}{dT} = C_v \qquad (١٠ - ٢)$$

من المعادلتين ( ٢ - ٩ ) و ( ٢ - ١٠ )

$$dU = C_v \, dT \; ( dV = 0 ) \qquad (١١ - ٢)$$

هناك حالات تبقى فيهـا المعادلة (٢ - ١١ ) قابلـة للتطبيق ( صحيحـة ) ، حتى في حالة تغير الحجم ( $dV \neq 0$ ) . ولهذا ، فإنه يمكن كتابة القانون الأول على النحو :

$$dQ = C_v \, dT + pdV \qquad (١٢ - ٢)$$

## ٢ - ٢ - ٣ إجراءات الغاز المثالي :

الغاز المثالي ( Ideal gas ) هو الغاز الذي يحقق المعادلات الآتية :

$$\left.\begin{array}{l} PV = nRT \\ \text{or} \\ Pv = R\,T \end{array}\right\} \qquad (١٣ - ٢)$$

$$C_p = \text{constant} \qquad (١٤ - ٢)$$

حيث :

P : ضغط الغاز المطلق ( $N / m^2$ ) .

V : حجم الغاز ( $m^3$ ) .

N : عدد المولات ( number of moles ) للغاز .

R : ثابت الغاز ( J / mole. K ) .

T : درجة حرارة الغاز المطلق ( K ) .

v : الحجم النوعي للغاز ( $m^3 / kg$ ) .

$C_p$ : الحرارة النوعية للغاز عند ثبات الضغط ( J / kg. K ) .

ويطلق على المعادلة ( ٢ ـ ١٣ ) اسم معادلة الحالة للغاز ( Equation of State ) في أغلب الأحيان .

ترتبط كل من ( $C_p$ ) و ( $C_V$ ) بالمعادلة :

$$C_p = C_V + nR \qquad (٢ ـ ١٥)$$

من المعادلتين ( ٢ ـ ١٣ ) و ( ٢ ـ ١٥ ) ــ وباستخدام الصيغة التفاضلية ( $dQ / dT$ ) لتعريف الحرارة النوعية ــ فإنه يمكن كتابة القانون الأول على النحو :

$$dQ = C_p\, dT - Vdp \qquad (٢ ـ ١٦)$$

١ ــ الإجراء الأديابتيكي : ( Adiabatic process )

باستخدام المعادلة ( $d\,Q = 0$ ) للإجراء الأديابتيكي فإنه بالإمكان حذف ( $d\,t$ ) من كلا المعادلتين ( ٢ ـ ١٢ ) و ( ٢ ـ ١٦ ) للوصول إلى المعادلة :

$$P\,V^{\gamma} = \text{const.} \qquad (٢ ـ ١٧)$$

حيث :

$\gamma$ : الأس الأيسونتروبي للغاز ( $\gamma = \dfrac{C_p}{C_V}$ )

ويمكن حساب الشغل المنجز في حالة الإجراء الأديابتيكي من المعادلة ( ٢ ـ ١٢ ) كما يلي :

$$0 = C_V\, dt + P\, d\, V \qquad (٢ ـ ١٨)$$

أو :

$$\Delta\, W = -\, C_V\, \Delta\, T \qquad (٢ ـ ١٩)$$

**مثـــال :**

يـدخل البخـار لتوربين ــ ضغط منخفض بـدرجة حـرارة ٢٦٠° س ويخرج بدرجة حرارة ٣٥° س ، بافتراض عدم وجود تبادل حـراري مع المحيط الخارجي، مـا هو مقدار الشغل الذي ينجزه البخار ؟

إذا كانت الحرارة النوعية للبخار عند ثبات الحجم

$$C_V = 2009.3 \frac{J}{kg.C^\circ}$$

$$\Delta W = - C_V \Delta T$$

$$W = - 2009.3 \frac{J}{kg.C^\circ} (35 - 260) C^\circ$$

$$W = 452093 \ J / kg$$

يوضـح الشكـل ( ٢ ـ ٥ ) الإجـراء المذكـور على مخطط الضغط ــ الحجم النوعي ( P-v ) .

## ٢ ــ إجراء ثبات الحجم الايسوخوري :

**Isovolumnic Process (isochoric)**

بـاستخـدام المـعـادلـة ( $dV = 0$ ) لـهـذا الإجـراء فـإن الشـغـل المنجز ( $dW = 0$ ). ومن المعادلة ( ٢ ـ ١٢ ) نجد :

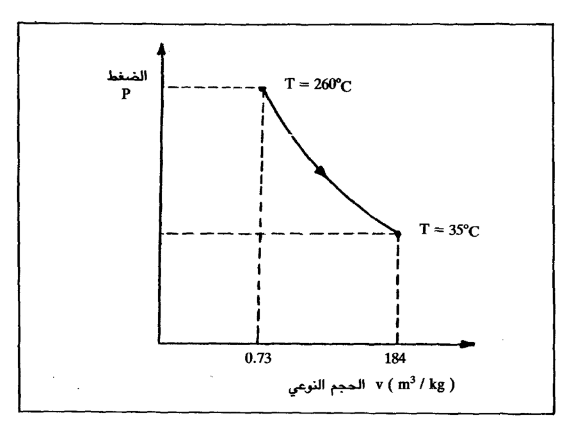
$$d Q = C_V dT \qquad (٢ ـ ٢٠)$$

أو :

$$Q = C_V \Delta T \qquad (٢ ـ ٢١)$$

وبمعرفة الحرارة المكتسبة خـلال هذا الإجـراء ( ثبات الحجم ) فـإنه يمكن حساب التغير في الضغط بالاستعانة بالمعادلة ( ٢ ـ ١٦ )

$$C_V dT = C_P dT - V d p \qquad (٢ ـ ٢٢)$$




**الشكل ( ٢ ـ ٥ )**
**الإجراء الأديابتيكي على مخطط ( P-v )**

$$d\,p = \frac{nR}{V}\,dT \qquad (٢ - ٢٣)$$

**مـثـال :**

بافتراض أن عملية احتراق شحنة الوقـود في أسطوانـات السيارة تتم مـع ثبات الحجم (تقريباً) ، احسب التغير في الضغط خلال هذا الإجـراء إذا علمت أن درجة الحرارة تزداد من ٥٤٠٠° س إلى ٢١٨٠° س خلال الاحتراق .

بافتراض أن الوسيط العامل هو الهـواء فإنـه يمكن إيجاد عـدد المولات من المعادلة ( ٢ ـ ١٣ )

$$n = \frac{P_0 V}{R T_0}$$

بالتعويض في المعادلة ( ٢ ـ ٢٣ )

$$\Delta p = \frac{P_0 V R}{R T_0} \quad \frac{\Delta T}{V} = \frac{P_0 \Delta T}{T_0} = \frac{P_0 (T_1 - T_0)}{T_0}$$

$T_0 = 400 + 273 = 673 \text{ K}$

$T_1 = 2180 + 273 = 2453 \text{ K}$

$$\Delta P = \frac{1 \text{ atm} \times (2453 - 673)}{673} = 2.64 \text{ atm}$$ ( ضغط جوي )

### ٣ ـــ الإجراء الايسوثيرمي ـــ ثبات درجة الحرارة :

**( Isothermal Process )**

باستخدام المعادلة ( $d\,t = 0$ ) لهذا الإجراء وبالتعويض في المعادلة (٢ ـ ١٢ ) نجد :

$$d\,Q = p\,d\,V \qquad (٢ ـ ٢٤)$$

أو :

$$Q = \int_{V_1}^{V_2} p\,d\,V \qquad (٢ ـ ٢٥)$$

وبالتعويض عن ( $p$ ) من معادلة الحالة للغاز المثالي في المعادلة ( ٢ ـ ٢٥ ) نجد :

$$Q = n\,R\,T\,\text{Ln}\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \qquad (٢ ـ ٢٦)$$

**مثال :**

إحدى وسائل خزن الطاقة ، تكون بضخ الغاز المضغوط في فجوات ضخمة

تحت الأرض ولعمل ذلك ايسوثيرمياً ، كان الضغط الابتدائي ١ ضغط جوي (1 atm) والضغط النهائي ٢٥ ضغط جوي. فما هو مقدار الحرارة المنتقلة لكل مول في هذا الإجراء؟

افترض درجة الحرارة $T = 30°C$ ، وأن ثابت الغاز للهواء

$$R_a = 8.317 \frac{J}{mol.K}$$

للإجراء الايسوثيرمي فإن ( $P_1 V_1 = P_2 V_2$ ) ولهذا يمكن كتابة المعادلة ( ٢ ـ ٢٦ ) على النحو :

$$Q = n R_a T Ln \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$$

$$Q = 8.317 \frac{J}{mol.K} 303\ K \ \ Ln \left( \frac{1}{25} \right)$$

$$Q = -8111.7\ J / mole$$

حيث ان الإشارة السالبة تعني أن الحرارة تُفقد من النظام ( الهواء المضغوط ) .

٤ ـ الإجراء الإيسوباري ـ ثبات الضغط : ( Isobaric Process )

هناك إجراءات حقيقية كثيرة تتم عند ثبات الضغط ( مثل معظم التفاعلات الكيميائية ) ولهذا الإجراء ( $dp = 0$ ) ، وبالاستعانة بالمعادلة ( ٢ ـ ١٦ ) نجد :

$$d Q = C_p d T \qquad (٢ ـ ٢٧)$$

أو:

$$Q = C_p \Delta T \qquad (٢ ـ ٢٨)$$

وباستخدام هذه النتيجة فإنه يمكن حساب الشغل من المعادلة ( ٢ ـ ١٢ )

$$C_p \Delta T = C_v \Delta T + p \Delta V \qquad (٢ ـ ٢٩)$$

# ٢ ـ ٣
# القانون الثاني في الثيرموديناميك

بينما يحدد القانون الأول العلاقة بين الشغل والحرارة في الدورة الثيرموديناميكية فإنه لا يضع حداً لمقدار هذا التحول من شغل إلى حرارة ، فحدود أو مقدار هذا التحول في الدورة المغلقة يحكمه القانون الثاني الذي ينص على ما يلي :

من المستحيل بناء آلة تعمل على دورة ثيرموديناميكية مغلقة تتحول الحرارة فيها إلى شغل فقط ، بمعنى آخر فإنه من المستحيل الحصول على آلة حرارية كفاءتها ١٠٠ ٪ .

في أي دورة ثيرموديناميكية حقيقية فإنه يجب أن تكون هناك حرارة مطرودة أو مفقودة ــ حسب القانون الثاني ــ ولهذا فإن الشغل الصافي الناتج عن الدورة يكون هو الفرق بين الحرارة المكتسبة أو المضافة للدورة والحرارة المفقودة أو المطرودة من الدورة .

$$W_n = Q_a - Q_r \qquad (٢ - ٣٠)$$

وتكون الكفاءة الحرارية للدورة :

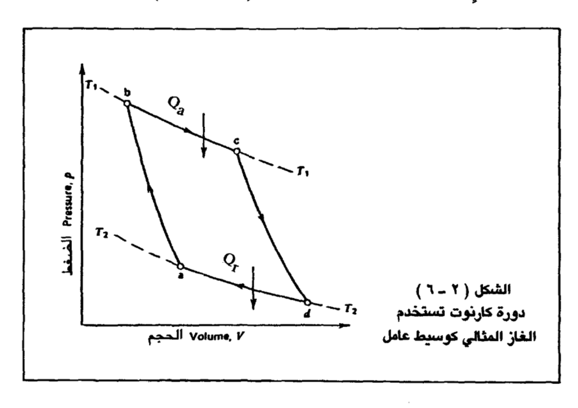
$$\eta_{th} = \frac{Q_a - Q_r}{Q_a} = 1 - \frac{Q_r}{Q_a} \qquad (٢ - ٣١)$$

وكما نرى فإن هذه الكفاءة تكون أكبر ما يمكن (١٠٠ ٪) عندما تكون قيمة الحرارة المطرودة صفراً ( $Q_r = 0$ ) ، ولكن كما سبق وذكرنا فإن ذلك يكون مستحيلاً حسب القانون الثاني

ويبقى السؤال قائماً ، ولكن ما هو مقدار أكبر كفاءة يمكن الحصول عليها من دورة كهذه؟ للإجابة عن هذا السؤال لا بد لنا من دراسة دورة كارنوت ( Carnot Cycle ) الثيرموديناميكية .

## ٢ ـ ٣ ـ ١ دورة كارنوت : ( Carnot Cycle )

درست هذه الدورة لأول مرة من قبل المهندس الفرنسي ( سادي كارنوت ) وتتكون من الإجراءات الثيرموديناميكية الآتية : ( شكل ٢ ـ ٦ )




الشكل ( ٢ ـ ٦ )
دورة كارنوت تستخدم
الغاز المثالي كوسيط عامل

١ ــ الإجراء ( $a \rightarrow b$ ) إجراء انعكاسي أديابتيكي ( ايزونتروبي ) ترتفع خلاله درجة حرارة الوسيط العامل ( غاز ) من درجة حرارة المصدر البارد ( $T_2$ ) إلى درجة حرارة المصدر الساخن ( $T_1$ ) .

٢ ــ الإجراء ( $b \rightarrow c$ ) يتم خلاله تمدد الوسيط انعكاسياً وايزوثيرمياً ( ثبوت درجة الحرارة ) على درجة حرارة المصدر الساخن ( $T_1$ ) .

٣ ــ الإجراء ( $c \rightarrow d$ ) يتم خلاله تمدد الوسيط انعكاسياً وأديابتيكياً ( ايزوثيرمياً ) حتى تعود درجة حرارته مرة أخرى إلى ( $T_2$ ) .

٤ ـــ الإجراء ( $d \rightarrow a$ ) يتم خلاله انضغاط الوسيط انعكاسياً وايزوثيرمياً على درجة الحرارة ( $T_2$ ) ، حتى يعود إلى وضعه الأصلي ، وبإتمام هذا الإجراء تكتمل الدورة .

تسمى كل آلة تعمل باستخدام هذه الدورة بآلة كارنوت ، وفي الواقع العملي فإنه لا يوجد مثل هذه الآلة ولكن مفهومها مفيد جداً في الثيرموديناميكا حيث انه يمكّننا من حساب كفاءة هذه الآلة ومقارنة كفاءات الآلات الأخرى بها، لأن كفاءة آلة كارنوت هي أعلى كفاءة يمكن الوصول إليها ولا يمكن لأي آلة حرارية أن تحقق كفاءة أعلى منها. وتعطى كفاءة آلة كارنوت بالمعادلة الآتية

$$\eta_c = 1 - \frac{Q_r}{Q_a} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (٢ ـ ٣٢)$$

حيث ان :

$T_2$ : درجة حرارة المصدر البارد المطلقة ( K )

$T_1$ : درجة حرارة المصدر الساخن المطلقة ( K )

إن أي آلة حقيقية تعمل بين درجتي الحرارة ( $T_1$ ) و ( $T_2$ ) ، لها كفاءة أقل من كفاءة كارنوت .

**مثال :**

سيارة كفاءتها الحرارية الفعلية ( $\eta_{th} = 30\ \%$ ) . قارن بين هذه الكفاءة وبين أقصى كفاءة ممكنة للسيارة إذا علمت أن درجة حرارة المصدر الساخن ( درجة حرارة الاحتراق داخل اسطوانات السيارة ) هي ( $1500°C$ ) .

نفترض أن درجة حرارة المصدر البارد ( الجو ) هي ( $20°C$ ) .

فالسيارة عبارة عن آلة تعمل بين درجتي حرارة المصدر الساخن ( الاحتراق داخل الاسطوانات ) والبارد ( الجو الخارجي ) .

$T_2 = T_L = 20 + 273 = 293\ K$ درجة مطلقة

$T_1 = T_H = 1500 + 273 = 1773\ K$ درجة مطلقة

$\eta_c = 1 - 293 / 1773 = 0.835$

فهذه الكفاءة ( كفاءة كارنوت ) أكبر من الكفاءة الفعلية بمقدار :

$$0.835 / 0.3 = 2.78$$

## ٢ ـ ٣ ـ ٢ المحرك الحراري :

يُعرف المحرك الحراري بأنه محرك ( يعمل باستمرار ) على نظام ثيرموديناميكي على حدوده تبادل بين الحرارة والشغل .

فهو عبارة عن محول للطاقة يعمل بشكل دوري ( يمر الوسيط العامل بإجراءات دورية ) ، فيكتسب الحرارة من مصدر ذي درجة حرارة مرتفعة ( $T_1$ ) ويحول جزءاً من هذه الطاقة إلى شغل مفيد ( $W_n$ ) ويفقد الجزء المتبقي إلى المصدر ذي درجة الحرارة المنخفضة ( $T_2$ ) كما هو مبين في الشكل ( ٢ ـ ٧أ )

يبين الشكل ( ٢ ـ ٧ب ) توربين غازي يعمل على دورة ثيرموديناميكية مغلقة ويمثل الخط المنقط حدود هذا النظام حيث يتم اكتساب الحرارة ( $q_1$ ) وفقد الحرارة ( $q_2$ ) عبر حدود النظام ويتولد الشغل ( $W_n$ ) ويقطع حدود النظام. وبما أن الوسيط العامل ( الغازات ) يمر بعمليات دورية فإن تعريف المحرك الحراري ينطبق على هذا التوربين، فهو محرك حراري.

كفاءة المحرك الحراري :

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_1} \qquad (٢ ـ ٣٣)$$

وبتطبيق القانون الأول في الثيرموديناميك نجد :

$$W_n = q_1 - q_2 \qquad (٢ ـ ٣٤)$$

إذاً :

$$\eta_{th} = \frac{q_1 - q_2}{q_2} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \qquad (٢ ـ ٣٥)$$

وكما مر سابقاً فإن أكبر كفاءة يمكن الحصول عليها هي كفاءة كارنوت

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (٢ ـ ٣٦)$$

الشكل (٢ - ٧)
المحرك الحراري

**مثـــال :**

في توربين غازي يعمل على دوره مغلقة كـانت الحرارة المكتسبـة من مصدر الحرارة الساخن ( الوقود ) هي ( 5 KJ ) لكل ( kg ) من الوسيط العـامل وكـانت الحـرارة المفقـودة إلى المصبّ البـارد ( المكثف ) هي ( 3.5 KJ / kg ) . احسب الشغل المنجز وكفاءة الدورة الحرارية .

$$W_n = q_1 - q_2 = 5 - 3.5 = 1.5 \text{ KJ/kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_1} = \frac{1.5}{5} = 30\ \%$$

إذا علمت أن درجـة حرارة المصـدر السـاخن ( $T_1 = 1000° C$ ) ودرجـة حرارة المصب البارد ( $T_2 = 25°C$ ) فما هي أقصى كفاءة ممكنة لهذه الدورة ؟

أقصى كفاءة ممكنة هي كفاءة كارنوت :

$$\eta_c = 1 - \frac{(25 + 273)}{(1000 + 273)} = 0.776 = 77.6\ \%$$

## ٢ ـ ٣ ـ ٣ مخططات الانتروبيا : ( Entropy diagrams )

في إجراء ما ، كإجراء انضغاط أو تمدد لغاز من دون حدوث انتقال حرارة من الغاز إلى المحيط الخارجي أو العكس فإن هذا الإجـراء يسمى إجراء أديابتيكياً . فالإجراء الأديابتيكي هو الإجراء الذي تكون فيه ( Q = 0 ) وإذا تم هـذا الإجراء من دون حدوث فواقد داخلية ــ كالفواقـد الناتجـة عن الاضطرابـات بين جزيئـات الغاز ــ فإن هذا الإجراء يسمى إجراء انعكاسياً أو ارجاعياً أي انه بالإمكان إعادة هذا الإجراء بشكل عكسي ليعود الغاز إلى حالته الأولى .

والإجراء الذي يحقق هـذيـن الشرطين معـاً ( الأديابتيكيـة + الانعكاسيـة ) يسمى بـالإجراء الايزونتروبـي ( Isentropic ) . الانتـروبيـا التي يـرمـز لهـا في الثيرموديناميكا بالرمز ( S ) هي مفهوم ثيرموديناميكي هام. فالإجراء الأيزونتروبـي هـو ذلك الإجـراء الذي لا تتغيـر فيه قيمـة الأنتروبيـا، أي أن ( $\Delta S = 0$ ) لهذا الإجراء .

إذا تم اكتساب الحرارة ( Q ) على درجة حرارة مطلقة ثابتة مقدارها ( T ) فإن الانتروبيا ( S ) تزداد بمقدار

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q}{T} \quad (15)$$

ومن هذه المعادلة نجد أن وحدات الانتروبيا ( S ) هي ( J / kg )

وتبرز أهمية الانتروبيا في الثيرموديناميكا الحرارية بشكل خاص ، حيث انها تُسهّل رسم الدورات الثيرموديناميكية وتحليلاتها الرياضية ، ففي دورة كارنوت ـ الموضحة سابقاً ـ وجدنا أن هناك إجراءات تبقى فيها الانتروبيا ثابتة ( إجراءات ايزونتروبية ) ولهذا فإنه من الطبيعي أن نفكر في إعادة رسم هذه الدورة باستعمال مخطط تكون الانتروبيا إحدى إحداثياته ، وفي الثيرموديناميكا فإنه من المألوف استخدام مخطط درجة الحرارة ـ الانتروبيا ( T - S ) لرسم الدورات المختلفة

يبين الشكل ( ٢ ـ ٨ ) دورة كارنوت ـ تستخدم الغاز كوسيط عامل ـ على مخطط ( T - S ) ومن هذا الشكل نجد أن الإجرائين ( d → a ) و ( b → c ) هما إجراءان ايزويثرميان ( ثبات درجة الحرارة ) ، فالحرارة المكتسبة في الدورة ( $Q_1$ ) هي المساحة تحت الإجراء ( b → c ) .

$$Q_1 = T_1 ( S_c - S_b ) \quad (٢ ـ ٣٧)$$

والحرارة المفقودة من الدورة ( $Q_2$ ) هي المساحة تحت الإجراء ( d→a )

$$Q_2 = T_2 ( S_d - S_a ) \quad (٢ ـ ٣٨)$$

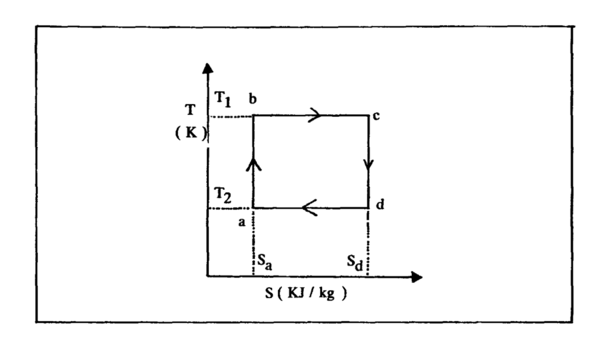
ويعطى الشغل المنجز بالمعادلة :

$$W_n = Q_1 - Q_2 \quad (٢ ـ ٣٩)$$

ولكن من الشكل نجد أن ( $S_d - S_a = S_c - S_b$ ) ، إذاً فالمساحة داخل الدورة ( a b c d ) هي الشغل المبذول :

$$W_n = ( T_1 - T_2 ) ( Sd - Sa ) \quad (٢ ـ ٤٠)$$

في الواقع العملي ، فإن الإجراءات يصاحبها دائماً زيادة في الانتروبيا. فالإجراء الأيزونتروبي هو إجراء مثالي من الصعب جداً تحقيقه .

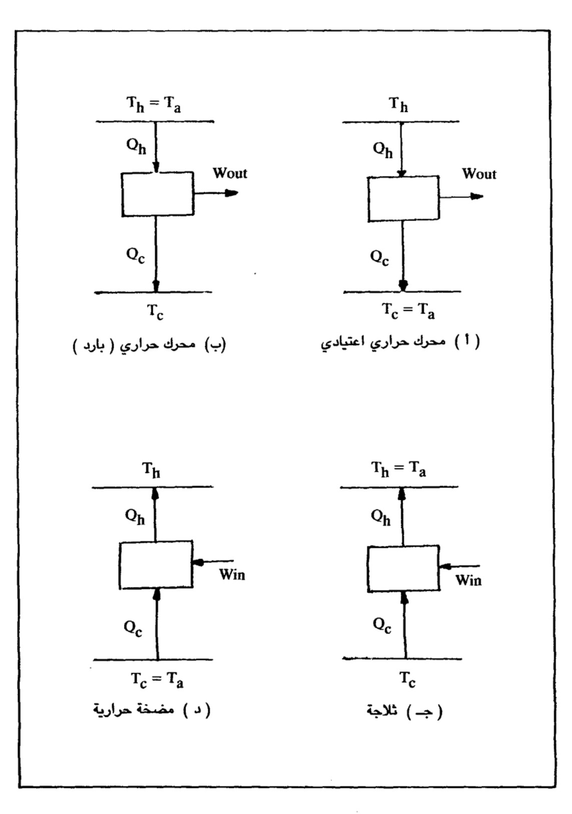



## ٢ ـ ٣ ـ ٤ الثلاجة ( دورة التبريد ) والمضخة الحرارية :
**( Refrigerator and Heat pump )**

يبين الشكل ( ٢ ـ ٩ ) رسماً توضيحياً للمهمات الأربع التي يقوم بها المحرك الحراري حيث ان الشكل ( ٢ ـ ٩ أ ) يبين محركاً حرارياً إعتيادياً والشكل ( ٢ ـ ٩ ب ) يبين محركاً حرارياً يعمل بين درجة حرارة الجو ( Ambient temperature Ta ) ودرجة حرارة مصدر بارد ( $T_c$ ) حيث تُمتص الحرارة من المصدر الساخن ـ نسبياً ـ ( $T_a$ ) وتطرد للمصدر البارد ( $T_c$ ).

مثل هذا المحرك نادر الاستعمال في الواقع العملي لأنه من الصعب توافر مصدر درجة حرارته أقل من درجة حرارة الجو . الشكل ( ٢ ـ ٩ ج ) يبين محركاً حرارياً معكوساً ، حيث ان الحرارة تُمتص من المصدر البارد ( $T_c$ ) وتطرد للمصدر الساخن ( درجة حرارة الجو Ta ) ، وذلك بإضافة شغل مقداره ( Win ) للنظام ، أي أن هذا المحرك يعمل كثلاجة . يعطى معامل الأداء للثلاجة بالمعادلة :

$$(COP)_R = \frac{Qh}{Win} \qquad (٢ ـ ٤١)$$




**الشكل ( ٢ ـ ٩ )**
**المهمات الأربع للآلة الحرارية**

حـيـث :

Qc : الحرارة الممتصة من المصدر البارد ( يطلق عليـه اسم المبخر في الثلاجة ) .

Win : الشغل الخارجي المضاف للنظام .

وإذا كان الغرض من المحرك الحراري المعكوس هو امتصاص الحرارة من الجو ( Ta ) وطرد هذه الحرارة إلى مصدر ذي درجة حرارة أعلى من درجة حرارة الجـو ( Th ) ، كما هـو مبين في الشكل ( ٢ ـ ٩ د ) ، فـإن هـذا المحـرك يسمى بالمضخة الحرارية ( Heat pump ) . ويعطى معـامل الأداء للمضخـة الحراريـة بالمعادلة :

$$(COP)_P = \frac{Qh}{Win} \qquad (٢ \text{ ـ } ٤٢)$$

حـيـث :

Qh : الحرارة المطرودة للمصدر الساخن ( بدرجة حرارة Th )

وكما نلاحظ فإن الفرق بين الثلاجة والمضخة الحراريـة هو أن الاهتمـام في حالة الثلاجة يكون بمقدار الحـرارة الممتصة من المصـدر البارد ( Qc ) في حين أنـه في حالـة المضخة الحـرارية فـإن ما يعنينـا هو الحـرارة المطرودة للمصـدر الساخن ( Qh ) . باستخدام القانـون الأول يمكن إيجاد أقصى معـامل أداء ممكن لكل من المضخة والثلاجة كالآتي :

للـثـلاجـة :

$$(COP)_R = \frac{Qc}{Win} = \frac{Qc}{Qh - Qc} = \frac{Tc}{Th - Tc}$$

$$(COP)_R = \frac{Th}{Th - Tc} - 1 = \frac{1}{\eta_c} - 1 \qquad (٢ \text{ ـ } ٤٣)$$

للمضخة الحرارية :

$$(COP)_p = \frac{Qh}{Win} = \frac{Th}{Th - Tc}$$

$$(COP)_p = \frac{1}{\eta_c} \qquad (٢ - ٤٤)$$

حيث :

$\eta_c$ : كفاءة دورة كارنوت .

وتكون العلاقة بين معاملي الأداء لكل من الثلاجة والمضخة الحرارية :

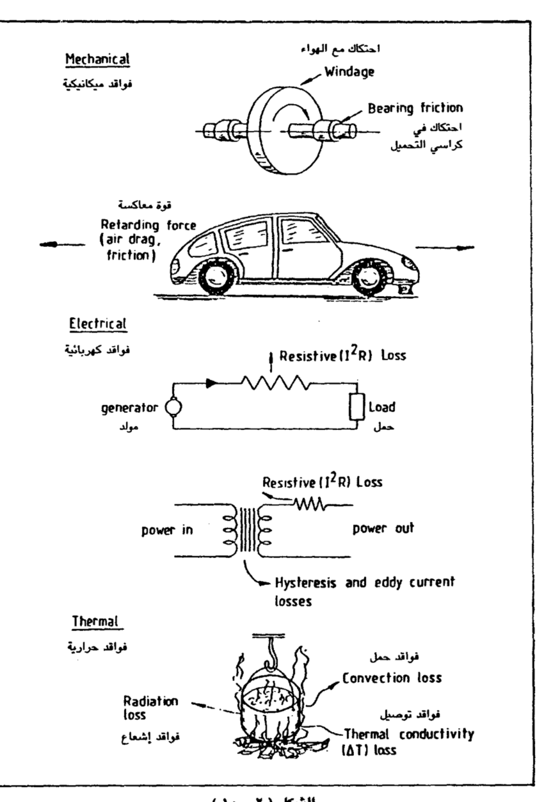
$$(COP)_R = (COR)_p - 1 \qquad (٢ - ٤٥)$$

## ٢ ـ ٤
## العوائق العملية في تحويل الطاقة

في الواقع العملي فإن جميع الآليات مهما كان نوعها تعاني من بعض فواقد الاحتكاك بدرجة معينة. فالبندول المشروح سابقاً ( انظر الشكل ( ٢ ـ ٢ ) ) يعاني من فواقد احتكاك لا إرجاعية أو لا إنعكاسية مع الهواء وعند نقطة التعليق. ومع مرور الوقت فإن حركة البندول تتباطأ تدريجياً حتى يتوقف البندول في النهاية عن الحركة. وفي جميع الأجهزة والآلات هناك دائماً ضياعات أو فواقد لا يمكن تجنبها وتسمى هذه الضياعات بالضياعات اللاإرجاعية .

وفي حالة الطاقة الحرارية فإنه لنقل هذه الطاقة يلزم فرق في درجة الحرارة بين نقطتين حتى تنتقل الحرارة بينهما عبر موصلات حرارية لها موصولية «معينة» وهذا يعني حدوث انخفاض تدريجي في درجة الحرارة باتجاه انتقالها، مما يجعل هذه العملية ( عملية انتقال الحرارة ) عملية لا إرجاعية .

يبين الشكل ( ٢ ــ ١٠ ) بعض الضياعات اللاإرجاعية .




الشكل ( ٢ ـ ١٠ )
بعض الضياعات ( الفواقد ) اللاإرجاعية

## ٢ ـ ٥
## اعتبارات عملية في اختيار محولات الطاقة

من خلال دراستنا للقانونين الأول والثاني تبيّن لنا بأن عملية التحويل الكامل للطاقة من شكل لآخر لا تتم سوى في ظروف مثالية استثنائية . ففي عملية تحول الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية فإن كفاءة التحويل تكون محدودة بدرجتي حرارة كل من المصدر الساخن ( Th ) ودرجة حرارة المصب البارد ( Tc ) وأقصى كفاءة يمكن الحصول عليها من عملية التحويل هذه هي كفاءة كارنوت .

فعمليات تحويل الطاقة في الظروف الاعتيادية ( غير المثالية ) يرافقها دائماً فواقد لا إرجاعية تقلل من كفاءة التحويل .

عند اختيار محول للطاقة في تطبيق عملي معين فإن كفاءة التحويل تلعب دوراً هاماً في عملية الاختيار هذه، إذ ان الخسائر الناتجة عن تدني كفاءة التحويل في حالة استخدام محول الطاقة أو وقود رخيص الثمن قد تزيد عنها في حالة استخدام نظام بديل ذي كفاءة تحويلية أعلى أو وقود مرتفع الثمن ــ نسبياً ــ .

فهناك دائماً متغيرات عديدة يجب أخذها بعين الاعتبار والمقارنة فيما بينها عند اختيار نظام معين لتحويل الطاقة تساعد في تحديد الخيار الأنسب، وبعض هذه الاعتبارات ما يلي :

١ ــ رأس المال : التكلفة المبدئية للجهاز أو النظام المراد تشغيله .

٢ ــ تكاليف التشغيل : مثل تكلفة الوقود مع أخذ كفاءة التحويل بعين الاعتبار وتكاليف الخدمة وقطع الغيار .

٣ ـــ متطلبات الصيانة : مثل الفنيين المدربين والمختصين في محطات التوليد الكبيرة .

٤ ـــ الموثوقية أو المعولية ( Relaiability ) للجهاز أو النظام واستمراره في الأداء . فمثلاً في حالة استخدام مضخة لرفع المياه في عملية الري فإن المطلوب هو جهاز تحويل ( محرك ) لتشغيل المضخة بشكل مرضٍ فترة طويلة من دون مشاكل فنية ...

٥ ـــ الأمان ( Safty ) : وهذا اعتبار هام جداً في بعض التطبيقات العملية مثل استعمال اسطوانات الغاز المضغوط في المنازل لإنتاج الطاقة الحرارية .

وعلى المستوى الحكومي فإن اختيار جهاز تحويل الطاقة المناسب يخضع لاعتبارات أخرى أوسع وأشمل من الاعتبارات المذكورة أعلاه مثل : الأمان في التزويد وسياسات التسعير وسياسة الطاقة طويلة الأمد والاستخدام ( العمالة ) ومشاكل تلوث البيئة والأمان .

• • •

# الفصل الثالث

# إنتاج الطاقة الحرارية

# ٣ ـ ١

# مقدمة الفصل الثالث

الطاقة الحرارية هي شكل أساسي من أشكال الطاقة حيث أن جميع الأشكال الأخرى من الطاقة يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية .

فالطاقة الميكانيكية يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية بواسطة الاحتكاك .

والطاقة الكهربائية يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية في عملية تسخين جول، فالحرارة المتولدة نتيجة مرور تيار مقداره ( $I$ ) امبير في مقاومة مقدارها ( $R$ ) أوم هي القدرة الكهربائية ( $p_e = I^2 R$ ) واط .

وتتحول الطاقة الكهرومغناطيسية إلى طاقة حرارية في عملية تسمى بعملية الامتصاص مثل تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية .

والطاقة النووية يمكن تحويلها إلى طاقة حرارية بواسطة التفاعلات النووية المختلفة كالانشطار والاندماج النوويين .

# ٣ ـ ٢

## الاحتراق ( Combustion )

### ٣ ـ ٢ ـ ١ وقـود الاحتـراق ـــ المـواد الهيدروكربونيـة التركيبية :

على الرغم من أن المركبات الهيدروكربونية تتكون جميعها من كربون ( C ) وهيدروجين ( H ) إلا أن إمكانيـة ترتيب ذرات الكـربون والهيـدروجين بعدة طـرق تجعل من الممكن الحصول على مـركبات هيـدروكربـونية متعـددة وذات خصائص مختلفة تمامـاً بعضها عن بعـض . فـالهيدروجين ( H ) يمكن أن يشـارك برابطـة تسـاهمية واحـدة بينما يمكن أن يشـارك الكـربـون بـأربعـة روابط . هنـاك ثـلاث مجموعات رئيسية للمركبات الهيدروكربونية هي :

١ ـــ الهيدروكربونات الاليفاتيكيه : ( Aliphatic hydrocarbons )

وهي مـركبـات ذات سلسلـة مستقيمـة ومفتـوحـة وتسمى بـالمـركبـات الهيدروكربونية الأليفاتيكيه وهذه المركبات لها الصيغـة العامـة ( $C_n H_{2n+2}$ ) وأبسط هذه المركبات هو الميثان ( $CH_4$ ) الشكل ( ٣ ـ ١ ) .

$$
\begin{array}{ccccc}
 & & H & & \\
 & & | & & \\
H & — & C & — & H \\
 & & | & & \\
 & & H & &
\end{array}
$$

الشكل ( ٣ ـ ١ )
الميثان $CH_4$

ومعظم وقود المستحاثات تقع ضمن هذه العائلة أو المجموعة. ومن الأمثلة الأخرى على هذه المجموعة البنتان ( $C_5H_{12}$ Pentane ) .

وتقسم هذه المجموعة إلى ثلاث مجموعات فرعية ، هي :

( أ ) الألكانات ( Alkane ) .

(ب) الألكينات ( Alkene ) .

( ج ) الألكاينات ( Alkyne ) .

٢ ــ الهيدروكربونات الاليسايكليه ــ الحلقيــة :
( Alicyclic hydrocarbons )

وهذه المجموعة هي مجموعــة حلقية ( Ring ) بسبب أن الجـزيئات تحتـوي على حلقــات من ذرات الكــربــون . والصيغــة العــامــة لهــذه المجمــوعــة هي ( $C_nH_{2n}$ ) ، ومن الأمثلة على مركبات هذه المجمـوعة السيكلـوبيوتــان ، المبين في الشكل ( ٣ ـ ٢ ) .



الشكل ( ٣ ـ ٢ )
التركيب الكيميائي للسيكلوبيوتان ( $C_4H_8$ )

٣ ــ الهيدروكربونات الأروماتيه أو العطريه : ( Aromatic )

وهي أيضاً مركبات حلقية كسابقتها وتكون الحلقة الأساسية هي حلقة بنزين ( Benzene ring ) أو حلقـات بنزين. وهذه الحلقة هي عبـارة عن حلقة ذات ست ذرات كربون والصيغة العامة لهذه المجموعة ، هي :

للجزيئات ذات الحلقة المفردة ( $C_n H_{2n-6}$ ) .

للجزيئات ذات الحلقة المضاعفة ( $C_n H_{2n-12}$ ) .

ومن الأمثلة على ذلك البنـزين ( $C_6 H_6$ ) والنفثالين ( $C_{10} H_8$ ) المبينـة في الشكل ( ٣ ـ ٣ ) .

Benzene          Naphthalene

الشكل ( ٣ ـ ٣ )
التركيب الكيميائي لكل من البنزين والنفثالين

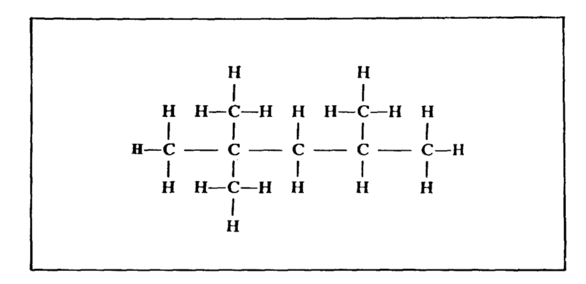
## ٣ ـ ٢ ـ ٢ الوقود المعياري : ( Standard Fuels )

هناك مركبات هيدروكربونية أساسية تستعمل كوقود معيـاري ( قياسي ) في محرك الاحتراق الداخلي، ففي حالة آلة الاحتـراق الداخلي بـالإشعال ( S I ) فـإن الوقود لهذه الآلة يُصنف ( Rated ) حسب رقم الأكتين :

أُعطي الايســوكتين ( $C_8 H_{18}$ ) الـرقم الأكتيني ( ١٠٠ ) مئـة ( الشكـل ( ٣ ـ ٤ ) :

وأعطي n ـــ بنتان ( $C_7 H_{16}$ ) الرقم الأكتيني صفر .

ولمعرفة الـرقم الأكتيني لوقـود ما يتم إحـراقه في آلـة فحص خاصـة حتى




الشكل ( ٣ - ٤ )
التركيب الكيميائي لمركب الايسوكتين ( $C_8H_{18}$ )

تحصل ظاهـرة الصفـع ( Detonation ) ثم تُخلط نسب حجمية من الايسـوكتين و n ـــ بنتان ( الوقود المعياري ) حتى نصل إلى مزيـج لـه نفس خصائص الوقود المراد فحصه من حيث ظاهرة الصفـع فتكون نسبة الايسـوكتين في هذا المـزيـج هي الرقم الأكتيني للوقود تحت الفحص .

ومعظم أنواع البنزين لها أرقام أكتينية تتراوح مـا بين ( ٨٥ ـــ ٩٥ ).وهناك أنواع من البنزين لها أرقام أكتينيـة أعلى من ( ١٠٠ ).ويمكن الحصول على هـذا النوع من الوقود بإضافة مواد هيدروكـربونيـة أخف من البنزين أو بـإضافـة مادة ( TEL Tetraethyl Lead ) للوقود الأساسي ( البنزين ) .

بـالنسبة لمحـرك الاحتراق الـداخلي بالانضغـاط ( C I ) فـإن وقـود هـذه المحركات يصنف حسب رقم السـيتين ( Cetane No. ) .

أعطـي مـركب n ـــ هكسـديكيـن ( n-Hexadecane $C_6$ $H_{34}$ ) الـرقـم السيتيني ( ١٠٠ ) مئة .

وأعطـي مـركب الألفـا ـــ ميتـانفثـاليـن ( alpha-methylnaphthalene $C_{11}H_{10}$ ) الرقم السيتيني صفر .

ويتم تصنيف وقود محركـات الديـزل بنفس الطريقـة التي يصنف بها وقـود

محركات البنزين باستخدام آلة فحص خاصة بمحركات الديزل .

والأرقام السيتينية لمعظم أنواع وقود محركات الديزل تتراوح ما بين ( ٣٠ ـ ٦٠ ) .

## ٣ ـ ٢ ـ ٣ فيزياء الاحتراق وتفاعلاته :

في الوقت الحاضر فإن المصدر الأساسي للطاقة هو توليد الطاقة الحرارية من الطاقة الكيميائية وأكثر التفاعلات الطاردة للحرارة أهمية في هذا المجال هو الاحتراق ، حيث تتأكسد في هذا التفاعل العناصر الثلاثة الرئيسة الموجودة في وقود المستحاثات ، وهي : الكربون ( C ) ، والهيدروجين ( H ) ، والكبريت ( S ) ، إلى ثاني أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) ، والماء ( $H_2O$ ) ، وثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) .

تتم عملية الاحتراق الفعلية لوقود المستحاثات بطريقتين :

١ ـ عند خلط وتسخين الهيدروكربونات في حالتها الغازية ـ بما في ذلك السوائل المتبخرة ـ قبل حدوث الإشعال فإن الأكسجين يتفاعل مع جزيئات الهيدروكربون في عملية تسمى عملية تكون الهيدروكسيل ( Hydroxlation ) والمركبات الناتجة من هذه العملية تسمى المركبات الهيدروكسيلية والتي تكون غير مستقرة وتتحول بسرعة إلى الدهايدات ( Aldehydes ) مثل الفورمالدهايد Formaldehyde ( $CH_2O$ ) ومن ثم يحترق الالدهايد إلى ثاني أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) وماء ( $H_2O$ ) واللهب الناتج يكون أزرق اللون وغير متوهج ( non luminous ) ، ويستعمل هذا النوع من الاحتراق في حارقات بنسون في المختبر وفي المدافىء وطباخات الغاز في البيوت .

٢ ـ في هذا النوع من الاحتراق يدخل كل من الوقود والهواء إلى الحارقة من دون عملية خلط مسبقة وهذا يتسبب في حدوث عملية خلط سريعة جداً وتسخين سريع للوقود والهواء مما يؤدي إلى تحطيم المركبات الهيدروكربونية إلى مركبات أخف وزناً ومن ثم إلى العناصر الأساسية من كربون وهيدروجين .

ونتيجة لهذا التحلل الحراري فإن معظم الاحتراق يجري لكل من عناصر الهيدروجين والكربون على حدة ، حيث يحترق الهيدروجين بلهب غير مرئي بينما يحترق الكربون بلهب أصفر ومتوهج. وهذا النوع من التفاعل يَغْلُب على احتراق الوقود الصلب ومعظم المواد الهيدروكربونية السائلة .

واحتراق اللهب الأصفر هو نوع مرغوب من الاحتراق خصوصاً في مراجل المحطات الكبيرة حيث انه يزيد من الطاقة المنتقلة بالإشعاع إلى أنابيب التسخين للمرجل ويخفِّض درجة حرارة الاحتراق .

وهناك ثلاث طرق فيزيائية لحرق وقود المستحاثات ، وهي :

١ ــ طريقة فرش الاحتراق ( Burning bed systems ) وتستعمل هذه الطريقة لحرق الوقود الصلب كما هو الحال في فرن ستوكر ( Stoker furnance ) حيث يجري حرق الفحم على قاعدة ثابتة أو فرش ثابت ( Stationary bed ) وكذلك تستخدم في عملية الاحتراق بواسطة الطبقات المخلخلة (Fluidized bed combustion).

٢ ــ طريقة اللهب المتحرك ( Travelling flame ) ويستخدم هذا النوع من الاحتراق في حالة استخدام الخلط المسبق للمتفاعلات مع الهواء حيث يتحرك اللهب بسرعة عبر الخليط بعد بدء الإشعال كما هو الحال في محركات الاحتراق الداخلي بالإشعال .

٣ ــ المشعل الغازي ( Gaseous torch ) ويستعمل هذا الاحتراق في محطات الطاقة الكبيرة حيث يجري خلط الوقود والهواء وحرقهما في الحارقة مباشرة. وكذلك ينطبق هذا النوع من التسمية على احتراق الوقود السائل المذرّر ( Atomized liquid fuels ) والوقود الصلب المسحوق بنعومة فائقة ( Finely powdered ) كما هو الحال في الفحم الحجري المطحون أو المسحوق ( Pulverized coal ) وعند حرق الوقود الثقيل بهذه الطريقة يتم تسخينه أولاً ثم تذريره ( Atomization ) في الحارقة . وهناك طرق أخرى للحرق ، تجمع الثلاثة أنواع ــ في نفس الوقت ــ كما هو الحال في الفرن الدوّامي ( Cyclone furnace ) حيث يحترق الفحم الحجري المهشم في دوّامة مشتعلة .

## ٣ ـ ٢ ـ ٤ تفاعل الاحتراق الكيميائي والقيم الحرارية :

يعتبر الكربون واحداً من أهم العناصر القابلة للاحتراق وجزءاً جوهرياً من أي مركب هيدروكربوني ، وعملية الأكسدة للكربون تعتبر عملية بطيئة وصعبة بالمقارنة مع تأكسد الهيدروجين أو الكبريت على الرغم من ان الكربون له درجة اشتعال أقل منها للهيدروجين وهي ٤٠٧° س .

في أي عملية احتراق نظرية فإنه من المألوف أن نفترض أن عنصري الهيدروجين والكبريت يحترقان قبل الكربون وكذلك بالإمكان الافتراض أن جميع الكربون يتأكسد إلى أول أكسيد الكربون، ( $CO$ ) قبل أن يتحول إلى ثاني أكسيد الكربون ( $CO_2$ ) والتفاعل الكيميائي للكربون هو :

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO + 2Q_{c-co}$$

$$( Q_{c-co} = 110380 \text{ KJ / kg. mol c} )$$

حيث ان ( $Q_{c-co}$ ) هي القيمة الحرارية اللازمة لتحول الكربون إلى أكسيد الكربون ( الحرارة المنطلقة أو المحرّرة نتيجة لهذا التفاعل ) وفي هذا التفاعل فإن مولين من الكربون ( ٢٤,٠٢ كغم ) يتفاعلان مع مول واحد من الأكسجين ( ٣٢ كغم ) لإنتاج مولين من أول أكسيد الكربون ( ٥٦,٠٢ كغم ) وإذا توافر الأكسجين بشكل زائد ، فإن أول أكسيد الكربون يتأكسد إلى ثاني أكسيد الكربون حسب التفاعل التالي :

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2Q_{co-co2}$$

$$( Q_{co-co2} = 283180 \frac{\text{KJ}}{\text{kg. mol c}} )$$

ومن هذا التفاعل نجد أن مولين من أول أكسيد الكربون يتفاعلان مع مول من الأكسجين لإنتاج مولين من ثاني أكسيد الكربون ( ٨٨,٠٢ كغم ) ويلزم كمية من الأكسجين مقدارها ( ٦٤ / ٢٤,٠٢ = ٢,٦٦ كغم ) لحرق ( ١ كغم ) من الكربون بشكل كامل. وهذه النسبة مفيدة في تقدير كمية الأكسجين اللازمة لحرق الهيدروكربونات

$$2.66 \text{ kg } O_2 / 1 \text{ kg}°C$$

والقيم الحرارية العليا ( H H V ) والدنيـا ( L H V ) للكربـون متساويـة وهي :

$$( HHV = LHV = 32778 \frac{KJ}{kg°C} )$$

للهيـدروجين أعلى درجة حـرارة اشتعـال ( ٥٨٢° س ) من بين العنـاصـر المشتعلة ولكن عملية احتراقه سـريعة جـداً ويحترق بلهب غيـر مرئي ، وإذا توافر الأكسـجين الكافي فإن الهيدروجين يتحول إلى ماء بسرعة كبيرة جـداً ــ قد تسبق تحول الكربون إلى أول أكسيد الكربون ــ حسب التفاعل :

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 2Q_H$$
$$( Q_H = 286470\ KJ / kg.\ mol\ H_2 )$$

وكمـا نرى فـإن مولين من الهيـدروجين ( ٤,٠٣٢ كغم ) يتفاعـلان مـع مول واحد من الأكسجين ( ٣٢ كغم ) لتنتـج مولين من المـاء ( ٣٦,٠٣٢ كغم ) وهكذا فإن كتلة الأكسجين اللازمة لحرق ( ١ كغم ) من الهيدروجين بشكل كامل هي :

$$32 / 4.032 = 7.94\ kg\ O_2 / kg\ H_2$$

والقيمة الحرارية العليا ( H H V ) للهيدروجين هي :

$$( HHV = 142097\ kJ / kg )$$

والقيمة الحرارية الدنيا ( L H V ) للهيدروجين هي :

$$( LHV = 120067\ KJ / kg )$$

أما الكبريت فله درجة حرارة اشتعال مقدارها ٢٤٣° س وتنطلق الحرارة من تأكسده إلى ثاني أكسيد الكبريت $SO_2$ ــ أحد ملوثات الجو الخطرة ــ بـواسطة التفاعل التالي :

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 + Q_S\ ( Q_S = 296774\ KJ / kg.\ mol\ S )$$

حيث إن مولاً واحداً من الكبريت ( ٣٢,٠٦ كغم ) يتفاعل مع مـول واحد من الأكسجين ( ٣٢ كغم ) لإنتاج مول واحد من ثاني أكسيد الكبريت ( ٦٤,٠٦ كغم )

وهكذا يلزم :

$$32 / 32.06 = 0.998 \text{ kg } O_2 / 1 \text{ kg S}$$

والقيم الحرارية العليا والدنيا للكبريت متساويتان :

$$( HHV = LHV = 9257 \text{ KJ} / \text{kg S} )$$

ولأغراض حسابات الاحتراق فإننا سنفترض أن الهواء الجوي يتكون من ٢١ ٪ أكسجين و ٧٩ ٪ نيتروجين وهذه نسب حجمية وتساوي ٢٣,٢ ٪ أكسجين و ٧٦,٨ ٪ نيتروجين كنسب وزنية ( كتلية ) .

والوزن الجزيئي للهواء هو :

$$( MW_a = 28.97 \frac{kg}{kg.mol} )$$

## ٣ ـ ٢ ـ ٥ القيمة النظرية لنسبة الهواء / الوقود :

**( Theortical air-fuel ratio )**

إن القيمة النظرية أو الستويكمترية ( Stoichiometric ) لنسبة هواء / وقود تُحدّد القيمة الدنيا اللازمة من الهواء ليتم الاحتراق بشكل كامل ، ويمكن التعبير عنها بإحدى النسب الآتية :

١ ـ كتلة الهواء / كتلة الوقود .

٢ ـ مولات الهواء / مولات الوقود .

٣ ـ حجم الهواء / حجم الوقود .

من خلال دراسة تفاعلات الاحتراق ، توصلنا إلى أن نسب الأكسجين اللازمة لحرق كل من الكربون والهيدروجين والكبريت هي :

$2.66 \text{ kg } O_2 / 1 \text{ kg C}$

$7.94 \text{ kg } O_2 / 1 \text{ kg } H_2$

$0.998 \text{ kg } O_2 / 1 \text{ kg S}$

وهكذا فإن نسبة الكتلة ( هواء / وقود ) النظرية الجافة ( dry ) :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,\,m} = \frac{\text{(كغم } O_2\text{) اللازمة من الهواء لكل (كغم) من الوقود}}{0.232} \qquad (\text{٣ - ١})$$

حيث ان العامل ( 0.232 ) في المقام يمثل نسبة الكتلة للأكسجين في الهواء الجوي ، وباستخدام نسب الأكسجين اللازمة لحرق الكربون والهيدروجين والكبريت فإن المعادلة ( ٣ ـ ١ ) يمكن كتابتها على النحو :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,m} = \frac{2.66\ C + 7.94\ H_2 + 0.998\ S - O_2}{0.232} \qquad (\text{٣ - ٢})$$

حيث ان $O_2$ : هي النسبة الكتلية للأكسجين الموجود في الوقود .

**مثـال :**

احسب النسبة النظرية هواء / وقود $(A/F)_{th,d}$ لأحد أنواع الفحم الحجري إذا كانت له النسب التالية عند حرقه ( As - burned ) .

4 % M ( رطوبة ) moisture , 5 % A ( رماد ) ash

75.62 % C, 5.01 % $H_2$ , 6.73 % $O_2$, 1.91 % $N_2$

1.73 % S, H H V = 31493 KJ /kg

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,m} = \frac{(2.66)\ (0.7562) + (7.94)\ (0.0501) + (0.998)\ (0.0173) - (0.0673)}{0.232}$$

$$= 10.17\ \text{kg ( air ) / kg ( coal )}$$

**مثـــال :**

كانت نتائـج التحليل النهائي ( Ultimate analysis ) الوزنية لمكونات أحـد أنواع الفحم الحجري كالآتي :

73.99 % C , 5.39 $H_2$ , 10.02 % $O_2$

1.38 % $N_2$ , 1.79 S , ash 7.43 %

إحسب كمية الهواء النظرية اللازمة لحرق هذا الفحم بشكل تام .

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,m} = \frac{(2.66)\quad(0.7399)\quad+\quad(7.94)\quad(0.0539)+(0.998)\;(0.0179)-0.1002}{0.32}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,m} = 9.973\ kg\ (\ air\ )\ /\ kg\ (\ coal\ )$$

في حالة الوقود الغازي ، فإنه من الأسهل التعامل مـع نسبة الهواء / الوقود المولية بدلاً من النسبة الوزنية ( الكتلية ) ، فإذا عـرّفنا ( Z ) بـأنها عـدد الذرات لعنصر ما ، الموجودة في مول واحد من الـوقـود فـإن هذه القيمـة ( Z ) تكون في الواقــع مجموع نواتـج ضرب الأجزاء المولية ( الكسور المـولية ) لمـركب الوقـود وعدد مولات عنصر معين في هذا المركب .

وكمثال لذلك لو أخذنا الايسوكتين :

( $C_8\ H_{18}$ isooctane ) ـــ وقود سائل ـــ فإن :

$Z_C = 8$ للكربون

$Z_H = 18$ للهيدروجين

وللوقود الغازي المؤلف من :

( 50 % $CH_4$ ) , ( 40 % $C_2\ H_6$ ) , ( 5 % $H_2\ S$ ) , ( 5 % $O_2$ )

فـــإن :

$Z_C = (0.5)(1) + (0.4)(2) = 1.3$

$$Z_H = (0.5)(4) + (0.4)(6) + (0.05)(2) = 4.5$$

$$Z_S = (0.05)(1) = 0.5$$

$$Z_O = (0.05)(2) = 0.1$$

وكما هو الحال بالنسبة لـ ( A/F ) الكتلية فإن ( A/F ) المولية تعتمد على نسب الأكسجين المولية اللازمة لحرق مول واحد من كل من الكربون والهيدروجين والكبريت وهي :

$1 \text{ mole } O_2 / 1 \text{ mole } C$

$0.25 \text{ mole } O_2 / 1 \text{ mole } H$

$1 \text{ mole } O_2 / 1 \text{ mole } S$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,\, mol} = \frac{Z_C + 0.25\, Z_H + Z_S - 0.5\, Z_O}{0.21} \qquad (٣ - ٣)$$

حيث :

$Z_O$ : عدد مولات الأكسجين في الوقود، والعامل ( 0.21 ) في المقام هو نسبة الأكسجين الحجمية في الهواء الجوي .

والعلاقة بين ( A/F ) الوزنية و ( A/F ) المولية ( الحجمية )

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,\, m} = \frac{28.97}{M\, W_F}\left(\frac{A}{F}\right)_{th,\, mol} \qquad (٤ - ٣)$$

حيث :

28.97 : الوزن الجزيئي للهواء .

$M\, W_F$ : الوزن الجزيئي للوقود .

مثـــال :

احسب $(A/F)_{th,\ mol}$ – المولية – لغـاز البترول المســال ( L P G )
المكون من ( $40\ \%\ C_3H_8$ ) و ( $60\ \%\ C_4H_{10}$ )

$(A/F)_{th,\ m}$ – الوزنية – لهذا الوقود .

$$Z_C = 0.4\,(3) + 0.6\,(4)$$
$$= 3.6 \text{ moles of C atoms / mole gas}$$

$$Z_H = 0.4\,(8) + 0.6\,(10)$$
$$= 9.2 \text{ moles of H atoms / mole gas}$$

النسبة المولية النظرية هواء / وقود

( Theortical molar air - fuel ratio )

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,mol} = \frac{3.6 + 0.25\,(9.2) + 0 - 0}{0.21}$$

$$= 28.1 \text{ mole air / mole gas}$$

نسبة ( هواء / وقود ) الموليـة مساويـة لنسبة ( هـواء / وقود ) الحجميـة فإن :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,\ vol} = 28.1 \text{ m}^3 \text{ air / m}^3 \text{ gas}$$

نسبة ( هواء / وقود ) الوزنية :

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,\ mol} = \frac{28.97}{(M\ W)_{Fuel}}\left(\frac{A}{F}\right)_{th,\ mol}$$

$$(M\ W)_{Fuel} = 0.44\,(44.094)\ 0.6\,(58.12) = 52.51\ \frac{kg}{kg.mol}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,\ m} = \frac{28.97 \frac{\text{kg air}}{\text{kg. mol air}} * 28.1 \frac{\text{kg. mol air}}{\text{kg. mol fuel}}}{52.51 \frac{\text{kg fuel}}{\text{kg. mol Fuel}}}$$

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{th,\ m} = 15.50 \text{ kg air / kg. fuel}$$

## ٣ ـ ٢ ـ ٦ القيمة العملية لنسبة الهواء / الوقود : ( Actual air/Fuel ratio )

إن المتطلبات الخمسة التي تضمن حدوث احتراق جيد ( كامل ) هي :

١ ــ خلط جيد للمواد المتفاعلة .

٢ ــ هواء كافٍ .

٣ ــ درجة حرارة كافية .

٤ ــ وقت كافٍ .

٥ ــ كثافة كافية للمزيج لضمان انتشار اللهب .

إن الخلط المثالي ( الكامل ) من الصعب جداً الحصول عليه في عمليات الاحتراق الفعلية ، إلاّ أنه بالإمكان ضمان حدوث احتراق جيد وذلك بتزويد عملية الاحتراق بالهواء الزائد . وطبيعة نواتج الاحتراق ( الغازات العادمة ) تعتمد على كمية الهواء الزائد ودرجة الخلط ( كفاءة الخلط ) للمواد المتفاعلة. وتضم هذه النواتج ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء وثاني أكسيد الكبريت وبعض المواد التي لم يكتمل احتراقها كجزء من الوقود غير المحترق وأول أكسيد الكربون وهيدروكسيلات والدهايدات ونيتروجين ومركبات نيتروجينية كأول أكسيد النيتروجين ( NO ) وثاني أكسيد النيتروجين ( $NO_2$ ). وجميع هذه النواتج باستثناء النيتروجين والماء تعتبر ملوثات للبيئة .

هناك طريقتان للتعبير عن مقدار الهواء المزود في عملية الاحتراق ، وهما :

١ ــ معامل التخفيف ( D C dilution coefficient ) .

٢ ــ النسبــة المئويــة للهــواء الــزائــد ( P E A percentage of excess air ) .

$$D\,C = \frac{\text{actual ( A/F ) ratio}}{\text{Theor. ( A/F ) ratio}} \qquad (٣ - ٥)$$

$$P\,E\,A = \frac{(A/F)_{act} - (A/F)_{th}}{0.01\,(A/F)_{th}} = 100\,(DC - 1.0) \qquad (٣ - ٦)$$

إن النسبة العملية للهواء / وقود $(A/F)_{act}$ لاحتـراق ما ، يمكن تقـديرهـا بواسطة التجارب العملية وذلك بتحليل الغازات العادمة بواسطة أجهزة خاصة مثـل جهاز الكرومتغراف ( Chromatograph ) وجهاز أورسات ( Orsat apparatus ) وغيرها .

## ٣ ـ ٢ ـ ٧ مبادىء حارقات الفحم الحجري :
## ( Coal combustion systems )

### ١ ــ فرن ستوكر : ( Stoker furnace )

يعتبر فرن ستوكر واحداً من أقدم معدات حرق الفحم الحجـري التي لا تزال تستعمل حتى اليوم ، ولكـون سعته محـدودة فإنـه لا يستعمل في تطبيقـات القدرة الكبرى ولكنه يستعمـل في إنتاج كميـات محدودة من البخـار في بعض العمليات . يُدخل الفحم المراد حرقه على شبكة ، ثم يتم إحـراقه على فـرش ( قاعـدة ) ثابت ( Stationary bed ) وفـي هـذا الفـرن يحـرق الفحـم المـهشـم أو المحطـم ( Crushed ) ويتم إدخـال جـزء من الهـواء يسمى ( Primary air ) من أسفـل الفرش.يعمل على بدء عملية الاحتـراق وتبريـد الفرش ــ في نفس الـوقت ــ ويتم إدخـال هواء ثـانوي ( Secondary air ) من الجهـة العليا للفـرش لإتمـام عمليـة الحرق . هناك عدة أنواع من فرن ستوكر من أشهرها :

( أ ) الشبكة المسلسلة والشبكـة المتحركـة : ( Chain - grate and traveling grate ) : يتكون هذا النظام من شبكة حـديدية ومتحركة

يتراكم عليها الفحم المهشم خلال عملية حرقه. ويعتبر هذا النوع أبسط أنواع أفران ستوكر وأقلها تكلفة ولكنه لا يصلح لحرق الفحم القابل للتكتل (Coking coals) لعدم وجود تقليب أو تحريك كافٍ للفحم المحترق على الشبكة .

(ب) **الشبكة المهتزة** : ( Vibrating grate ) وهذه مشابهة للشبكة المسلسلة ما عدا أن حركة الشبكة لا تكون في اتجاه ثابت كما هو الحال في الشبكة المسلسلة وكذلك فإن الشبكة تُهز خلال عملية الاحتراق .

( ج ) **الفرن ذو التغذية السفلية** : ( Under feed stoker ) يتم إدخال الفحم إلى قاع الفرش من الأسفل بواسطة أحواض تغذية خاصة .

( د ) **الفرن ـ الموزع** : ( Spreader stoker ) وهذا أحدث نوع من أنواع أفران ستوكر وأوسعها انتشاراً وذلك لبساطته وسعته العالية وتكلفته القليلة وعدم حساسيته لخصائص الفحم . وفي هذا الفرن يتم قَذف الفحم إلى فرش الاحتراق بشكل عرضي ( عمودي على اتجاه حركة الفرش ) بواسطة مجاديف دوّارة ( Rotating paddles ) أو مراوح أو بواسطة موزع هوائي يُشغل بواسطة هواء أو بخار عالي الضغط .

يبين الشكل ( ٣ ـ ٥ ) صورة توضيحية للفرن الموزع مع نظام قذف الفحم .

الشكل ( ٣ ـ ٥ )
الفرن الموزع

٢ ــ افران الفحم المسحوق : ( Pulverized - Coal Furnaces )

تحـرق هذه الأفـران الفحم المسحوق ــ بشكـل نـاعم جـداً والمخلـوط مـع الهـواء ــ بمشعل غـازي ،( Gaseous torch ) ويمكن لنظام الاحتـراق هذا ، أن ينتج قدرات أكبر بكثير من تلك التي ينتجها فرن ستوكر، وهو ذو استجابة سريعة ( Fast response ) لأنه لا يكون سـوى كمية قليلـة من الوقـود غيـر المحترق في غرفة الاحتراق، وفي هذا النظام فإن كمية الهواء الزائدة ــ المطلوبة للاحتـراق ــ تكون أقل ، مما يقلل من تكون أكاسيد النيتروجين الملوثة ( $NO_X$ ) .

ويمكن بهذه الطريقة حرق عـدة أنواع من الفحم وأنـواع أخرى من الـوقود كـالبترول والغـاز ، ولوجـود هذه الميـزات ، فإن هـذه الأفران تستعمـل بكثـرة في محطات القوى التي تستخدم الفحم الحجري كمصدر للوقود .

هناك بعض المساوىء لهذا النظام أهمها أن الفحم المسحوق يحتاج إلى آلة سحق ( Pulverizer ) للفحم. وهذه معقدة التركيب وتحتاج إلى قدرة كبيرة لتشغيلها ويلزمها صيانة دائمة ودقيقة، بالإضافة إلى مشكلة الرماد المتطـاير ومـا يسببه من تلوث ، مما يزيد في متطلبات الصيانة لنظام العادم. كذلك فإن تكـاليف إنشاء هـذا النظام باهظة ويتطلب أحجاماً كبيرة لعمليـة الاحتراق . وهنـاك عدة أنـواع من آلات سحق الفحم ولكنها جميعاً تعتمد واحدة أو أكثر من عمليات السحق الثلاث الآتية :

١ ــ التهـشـيم ( Crushing ) .
٢ ــ الـصـدم ( Impact ) .
٣ ــ الفرك أو الحك ( Attrition ) .

والحك عبارة عن عملية طحن أو سحق للفحم عن طريق احتكـاك جزيئين من الفحم بعضهمـا مـع بعـض . وتعمـل آلـة السحق على سحق الفحم وتنعيمـه إلى درجة عالية وتجفيفه قبل حرقه .

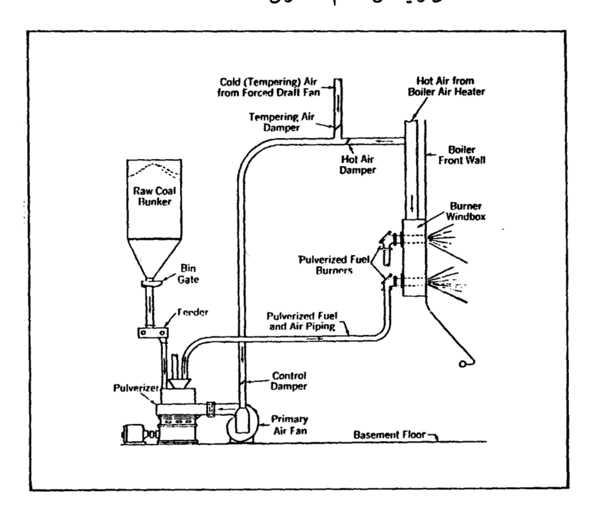
ويتم تسخين الهـواء الأولي ( Primary air ) إلى درجـة تتـراوح مـا بين ٢٦٠ ــ ٣١٥° س ثم يُضـخ بواسطة مروحة مستقلـة عبر آلـة السحق ليعمل على تجفيف الفحم المسحوق ، ثم ينقل من آلة السحق إلى الحارقة .

يبين الشكل ( ٣ ـ ٦ ) إحدى أنظمة الحرق المباشر للفحم المسحوق .

٣ ـ الأفران الدوّامية : ( Cyclone furnaces )

الفرن الدوامي عبارة عن نظام احتراق يستخدم غرف احتراق مستقلة يصل عددها إلى ١٦ غرفة في المحطات الكبيرة وجميع هذه الغرف تُغذي مرجلاً كبيراً بالغازات الساخنة . ويقوم هذا الفرن بحرق الفحم المهشم حيث يتم إدخال الفحم والهواء الأساسي بشكل مماسي ( من المحيط ) إلى غرفة اسطوانية كبيرة ومعزولة مما يعطيها حركة دوّامية خلال عملية الاحتراق .

هناك مشكلتان رئيستان لنظام الاحتراق هذا :




الشكل ( ٣ ـ ٦ )
نظام حرق مباشر للفحم المسحوق

( أ ) صعوبة حرق الفحم الحجري المحتوي على نسب منخفضة من الكبريت بسبب مشاكل مُخلفات الاحتراق .

(ب) في هذا الاحتراق تكون درجة حرارة الاحتراق عالية مما يتسبب في تكون أكاسيد النيتروجين ( $NO_X$ ) التي تعتبر مُلوثات رئيسة للبيئة .

#### ٤ ــ إحتراق الطبقات المخلخلة : ( Fluidized bed combustion )

يعتبر هذا الاحتراق نوعاً حديثاً من أنظمة الاحتراق حيث يتم إدخال كل من الفحم المهشم والرماد والحجر الكلسي( Lime stone ) أو الدولومايت ( Dolomite ) وخلطها جميعاً مع بعضها على فرش الاحتراق ، ثم يتم إدخال تيار هوائي بضغط معين من أسفل الفرش مما يؤدي إلى طَفو ( تعليق ) هذه الموادّ في الهواء وبالتالي تسهيل عملية احتراقها. تُغمس أنابيب المراجل أو الأنابيب المراد تسخينها في الطبقة المخلخلة المشتعلة مما يحقق اتصالاً ( تلامساً ) مباشراً بين أسطح هذه الأنابيب وجزيئات الفحم المشتعل وهذا يؤدي إلى زيادة معدلات انتقال الحرارة بشكل كبير وتقليل المساحة اللازمة لوحدة الحرق ويؤدي كذلك إلى تخفيض درجة حرارة الاحتراق .

الميزة الهامة لهذا النظام من الاحتراق هي القدرة على التحكم في التلوث لأن درجة حرارة الاحتراق المنخفضة ( ٨٢٠ ــ ٩٥٠° س ) تَمنع تكون أكاسيد النيتروجين ( $NO_X$ ) الملوثة للجو، كذلك فإن إضافة الدولومايت ( Calcium - magnesium carbonate ) أو الحجر الكلسي ( Calcium carbonate ) تؤدي إلى حدوث تفاعل بين الكالسيوم أو المغنيسيوم وثاني أكسيد الكبريت لتكوين سلفات الكالسيوم أو المغنيسيوم التي هي عبارة عن أملاح صلبة يمكن تجميعها من غرفة الاحتراق ، وبمعنى آخر فإن الكبريت الملوث للجو يتم التخلص منه ، مما يسمح بحرق فحم ذي محتوىً عالٍ من الكبريت . والعيب الرئيس لاحتراق الطبقات المخلخلة هو أن هواء الحرق يجب أن يتم تزويده بضغط عالٍ مما يتطلب وجود ضاغطة أو مروحة ذات قدرة كبيرة .

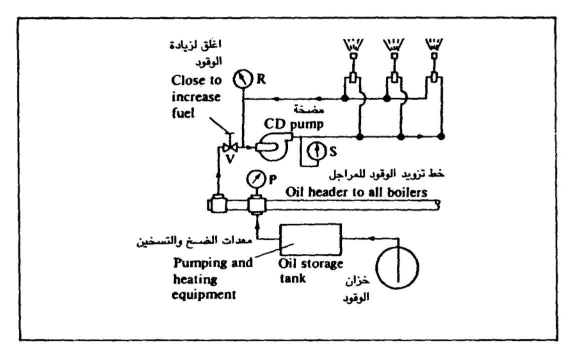
### ٣ ـ ٢ ـ ٨ أنظمة حرق الوقود الزيتي : ( Oil - fired systems )

يتكون نظام حرق الوقود الزيتي ( fuel - oil ) في العادة من خزان للزيت ومعدات ضخ وتسخين وأنبوب تغذية رئيسي للزيت وحارقات ( Burners ) وخط وقود ( زيت ) كما هو مبين في الشكل ( ٣ ـ ٧ ) .

تُعد عملية حرق الوقود الزيتي أصعب من عملية حرق الوقود الغازي ولكنها

أسهل من عملية حرق الفحم الحجري ، ويجب تحضير الوقود في الحارقـة بالنسب الصحيحة وخلطه مـع الهواء قبل حرقه .

والتحضير قبل الحرق ضروري ــ بشكـل خاص ــ في حـالة حـرق رواسب الوقود الزيتي( Residual fuel - oil ) وهناك عـدة طرق لتحضيـر الوقـود الزيتي للحرق مثل التبخير أو التحويل للحالة الغازية بواسطـة تسخين الزيت في الحـارقة أو تذرير ( Atomization ) الزيت في تيار هوائي .




الشكل ( ٣ ـ ٧ )
المكونات الرئيسية لنظام حرق الوقود الزيتي

وتستخدم عملية التبخير عادة في حالة حرق الوقود الزيتي الخفيف .

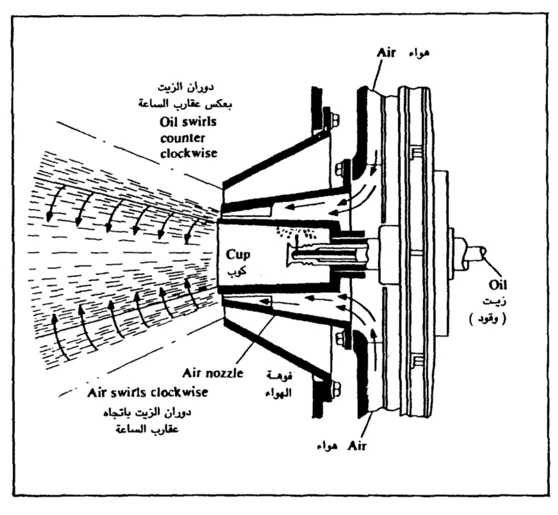
تتم عملية التذرير لقطرات الزيت باستعمال هواء عالي الضغط أو بخار عـالي الضغط أو بـواسطـة تمـزيق ( Torn apart ) طبقـة الـزيت الـرقيقـة ( Film ) بواسطة قوة الطرد المركزي .

إن عملية التذرير بواسطة الهواء أو البخار ملائمة في حالة الأحمال المتغيرة ويمكن بواسطة هذه العملية تغطية سعات مختلفة بدون تغيير تركيبة جهاز التذرير .

أما التذرير الميكانيكي فهو مناسب في حالة الأحمال الثابتة والسعات الكبيرة ولكن حدود السعة له محدودة .

يبين الشكل ( ٣ ـ ٨ ) حارقة الكوب الدوار ( Rotary - cup burner ) .

وتستخدم هذه الحارقة سرعات عالية تصل إلى ٣٥٠٠ دورة / دقيقة للكوب الدوار الأفقي، وذلك لإعطاء الزيت قوة دوّامية ( Spin ) تُخرجه من الحافة ( Rim ) إلى تيار الهواء بواسطة قوة الطرد المركزي وهذه الحارقة الميكانيكية لها مجال سعة كبير ( ١ ـ ١٦ ) .



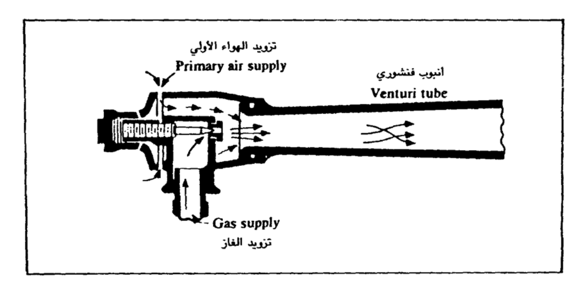

الشكل ( ٣ ـ ٨ )
حارقة الكوب الدوّار

## ٣ ـ ٢ ـ ٩ أنظمة حرق الوقود الغازي :

يعتبر الوقود الغازي من أسهل أنواع الوقود احتراقاً حيث انه لا يحتاج ـ في كثير من الأحيان ـ إلى تحضير قبل عملية الحرق . ويتم إعداد الوقود الغازي للحرق بخلطه مع الهواء بالنسب الصحيحة ، ثم إشعاله مباشرة، ويمكن عمل ذلك بعدة طرق .

### ١ ـ الحارقة الغازية الجوية : ( Atmospheric gas burner )

يعتبر هذا النوع أحد الأنواع المألوفة والشائعة الاستخدام . ويتم في نظام الحرق هذا سحب الهواء الأولي اللازم إلى الحارقة بواسطة زخم ( Momentum ) الغاز في عملية تسمى بعملية السفط ( Aspiration ) . وَتُشغَّل هذه الأنظمة بشكل اعتيادي باستخدام نسب خلط للهواء الأولي / غاز تتراوح ما بين ٣٠ ـ ٧٠ ٪ في حين يتم سحب الهواء الثانوي اللازم لإكمال الاحتراق في الهواء الجوي المحيط بالحارقة مباشرة . يبين الشكل ( ٣ ـ ٩ ) حارقة غازية جوية نموذجية .

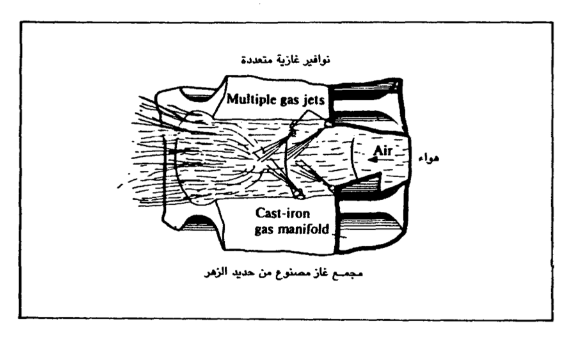



الشكل ( ٣ ـ ٩ )
حارقة غازية جوية

### ٢ ـ الحارقة الغازية المقاومة للصهر : ( Refractory gas burner )

يستخدم هذا النوع من الحارقات عادة في مولدات البخار، ويتم في هذا النظام سحب هواء الاحتراق مباشرة من الهواء الجوي المحيط بالحارقة التي

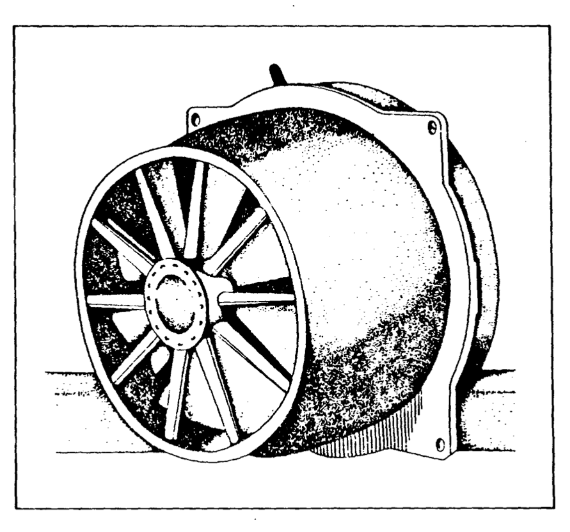
يتخللها عدة ثقوب يندفـع منهـا الغاز بقـوة إلى تيار الهـواء مما يؤدي إلى حـدوث خلط جيد للغاز مـع الهـواء .. وبعد ذلـك يتدفق الخليط عبـر أنبوب معـدني قصير مصنوع من معدن مقاوم للصهر لحمـايته من درجـات الحرارة المـرتفعة . الشكـل ( ٣ ــ ١٠ ) يبين إحدى أنواع الحارقات الغازية المقاومة للصهر .




الشكل ( ٣ ـ ١٠ )
حارقة غازية مقاومة للصهر

٣ ــ الحارقة مروحية الخلط : ( Fan - mix burner )

في نظام الاحتراق هذا ، يندفـع كل من الهواء والغاز من فوهات مثبتة بزوايا معينة داخل وعاء مجوف دوار على شكل مقلاة يرتبط مع مروحة، كما هـو مبين في الشكل ( ٣ ـ ١١ ) . وتؤدي قوة انـدفاع الهـواء والغاز إلى دوران كـل من الوعـاء والمروحة التي تعمل على خلط الهواء بالغاز خلال دورانها .



الشكل ( ٣ ـ ١١ )
الحارقة مروحية الخلط

# ٣ ـ ٣
# الطاقة الحرارية من الشمس

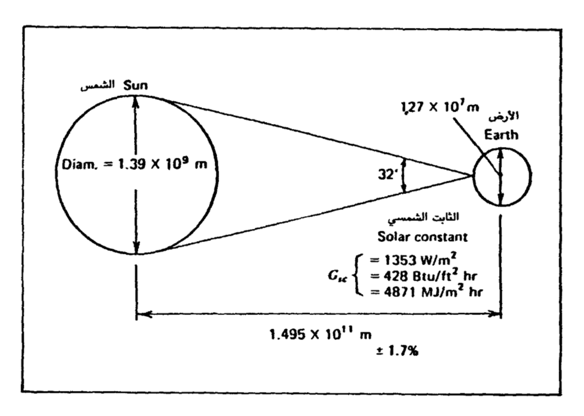
## ٣ ـ ٣ ـ ١ مقدمة :

الشمس عبارة عن كرة ملتهبة من الغازات الكثيفة يبلغ قطرها ١,٣٩ × ١٠^٩ متراً ومتوسط بعدها عن الأرض ١,٥ × ١٠^١١ متراً ودرجة حرارة سطحها الفعالة ٥٧٦٢ كلفن ( 5762 K ) بينما تتراوح درجات حرارتها الداخلية ما بين ٨ × ١٠^٦ ــ ٤٠ × ١٠^٦ كلفن . يبين الشكل ( ٣ ـ ١٢ ) رسماً تخطيطياً للعلاقات الهندسية بين الشمس والأرض .

يُعرف الثابت الشمسي ( Solar constant ) G S C بأنه الطاقة المشعة من الشمس في وحدة الزمن والساقطة على وحدة مساحة معامدة لاتجاه الإشعاع الشمسي وتبعد مسافة مساوية لمتوسط بعد الأرض عن الشمس خارج نطاق الغلاف الغازي للكرة الأرضية . وقد دلت القياسات الحديثة التي أجرتها المركبات الفضائية على أن قيمة هذا الثابت تبلغ حوالى ١٣٥٣ واط / متر مربع ، ونسبة الخطأ في هذه القيمة هي ∓ ١,٥ ٪ ( $G\,S\,C = 1353 \mp 1.5\ \%\ W/m^2$ ) .

وتعتبر الطاقة الشمسية أكثر مصادر الطاقة توافراً للجنس البشري ، وبالتحديد الطاقة الكهرومغناطيسية التي تبعثها الشمس، وعلى الرغم من أن الطاقة الشمسية لا تستعمل كمصدر رئيس للطاقة في الوقت الحاضر إلا أن هناك بحوثاً وجهوداً مستمرة لاستغلال أو تسخير الطاقة الشمسية بشكل اقتصادي لتصبح مصدراً رئيساً للطاقة خصوصاً في حقلي التبريد والتدفئة للمباني .

يمكن تحويل الطاقة الشمسية مباشرة إلى أشكال أخرى للطاقة في ثلاث




الشكل ( ٣ ـ ١٢ )
العلاقات المختلفة بين الشمس والأرض

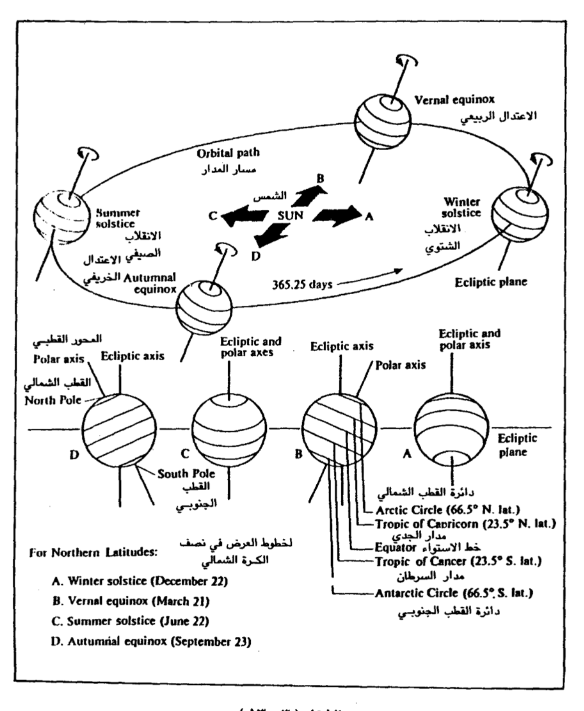
عمليات منفصلة، هي العملية الكيميائية الشمسية ( Helio chemical ) والعملية الكهربائية الشمسية ( Helio electrical ) والعملية الحرارية الشمسية ( Helio thermal ) .

فالعملية الكيميائية الشمسية إنما هي عملية التمثيل أو التركيب الضوئي التي هي أساس وقود المستحاثات. والعملية الكهربائية الشمسية هي عملية توليد الكهرباء بواسطة الخلايا الشمسية ( Solar cells ) . والعملية الحرارية الشمسية هي عملية امتصاص الإشعاع الشمسي وتحويل هذه الطاقة الإشعاعية إلى طاقة حرارية، وهذه العملية هي العملية التحويلية الوحيدة للطاقة الشمسية التي تصل كفاءتها إلى ١٠٠ ٪ .

## ٣ ـ ٣ ـ ٢ الأوقات الشمسية :

تدور الشمس حول الأرض في مدار يتخذ شكل القطع الناقص ( Elliptical ) كما هو مبين في الشكل ( ٣ ـ ١٢ ) وتكون الأرض في أقرب

أوضاعها من الشمس في ٢١ كانون الأول حيث يبلغ بعدها عن الشمس في هذا اليوم حوالى ١,٤٥ × ١٠^١١ متراً وتكون في أبعد أوضاعها عن الشمس في




الشكل ( ٣ - ١٣ )
دوران الأرض حول الشمس واتجاهاتها المختلفة بالنسبة للأشعة الشمسية

٢٢ حزيران حيث يبلغ بعدها عن الشمس حوالي ١,٥٤ × ١٠^١١ متراً .

يعرف الوقت الشمسي المتوسط ( Mean Sun Time M S T ) بأنه الوقت الشمسي المحلي ( Local Sun Time L S T ) لو كانت الأرض تدور حول الشمس بسرعة ثابتة، وبما أن مدار الأرض حول الشمس ليس دائرياً فإن هذا يعني أن سرعتها الدورانية حول الشمس ليست ثابتة، وهكذا فإن الشمس تظهر متقدمة أو متأخرة عن الوقت الشمسي المتوسط ( M S T ) وذلك تبعاً للوقت من السنة .

ويسمى الفرق بين الوقت الشمسي الحقيقي ــ يطلق عليه أيضاً اسم الوقت الشمسي الظاهر ( A S T ) ــ والوقت الشمسي المتوسط بمعادلة الزمن ( Equation of time ) .

وفي الواقع فإن معادلة الزمن ليست معادلة رياضية وإنما هي عبارة عن معامل تصحيح للزمن تعتمد قيمته على الوقت من السنة . الجدول ( ٣ ـ ١ ) يعطي بعض القيم لهذا المعامل لأوقات مختلفة من السنة .

ويمكن حساب الوقت الشمسي المتوسط بمعرفة خط الطول المحلي ، وبما أن الأرض تدور ٣٦٠° في ٢٤ ساعة حول نفسها فإن كل درجة من درجات دورانها تقابل زمناً مقداره ( ٢٤ × ٦٠ / ٣٦٠ ) أو ٤ دقائق . هناك خط طول وهمي يمر بالمركز التقريبي لكل نطاق زمني Time zone ( لكل ١٥ درجة دورانية للأرض ) يسمى بخط الطول القياسي ( Standard meridian ) لذلك النطاق الزمني وعلى هذا الخط فإن الوقت الشمسي المتوسط يكون مساوياً للوقت المحلي القياسي ( Local Standard time ) ويكون الوقت الشمسي متأخراً بمقدار ( ٤ دقائق / درجة دورانية للأرض ) إلى الشرق من خط الطول القياسي أو متقدماً بنفس المقدار إلى الغرب من هذا الخط عن الوقت المحلي القياسي :

الوقت الشمسي = الوقت المحلي القياسي
∓ [ درجات شرقاً( + ) أو درجات غرباً ( − )
من خط الطول القياسي ] ( ٤ دقائق ) ( ٣ ـ ٦ )

وبمعرفة الوقت الشمسي المتوسط فإنه يمكن حساب الوقت الشمسي الظاهر ( Apparant solar time A S T ) من المعادلة الآتية :

الوقت الشمسي الظاهر
= الوقت الشمسي المتوسط + معادلة الزمن ( ٣ ـ ٧ )

**Parameters for solar calculations** (on the 21st day of each month)

| Month | January | February | March | April | May | June | July | August | September | October | November | December |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Day of the year | 21 | 52 | 80 | 111 | 141 | 173 | 202 | 233 | 265 | 294 | 325 | 355 |
| Declination, degrees | – 19.9 | – 10.6 | 0.0 | + 11.9 | + 20.3 | + 23.45 | + 20.5 | + 12.1 | 0.0 | – 10.7 | – 19.9 | – 23.45 |
| Equation of time, min | – 11.2 | – 13.9 | – 7.5 | + 1.1 | + 3.3 | – 1.4 | – 6.7 | – 2.4 | + 7.5 | + 15.4 | + 13.8 | + 1.6 |
| Solar noon | Late | | | Early | | Late | | | Early | | | |
| A, Btu/h·ft²† | 390 | 385 | 376 | 360 | 350 | 345 | 344 | 351 | 365 | 378 | 387 | 391 |
| B, 1/m | 0.142 | 0.144 | 0.156 | 0.180 | 0.196 | 0.205 | 0.201 | 0.177 | 0.160 | 0.149 | 0.149 | 0.142 |
| C, dimensionless | 0.058 | 0.060 | 0.071 | 0.097 | 0.121 | 0.134 | 0.136 | 0.122 | 0.092 | 0.073 | 0.063 | 0.057 |

*A* is the apparent solar irradiation at air mass zero for each month.
*B* is the atmospheric extinction coefficient.
*C* is the ratio of the diffuse to direct normal irradiation on a horizontal surface.

( $1\ w / m^2 = 0.3173\ Btu / h.ft^2$ )

الجدول ( ٣ ـ ١ )
بعض المتغيرات اللازمة للحسابات الشمسية

حيث ان الوقت الشمسي ( A S T ) يستخدم لحساب بعض الزوايا الشمسية اللازمة لحسابات الطاقة الشمسية .

## ٣ ـ ٣ ـ ٣ الزوايا الشمسية : ( Solar angles )

**١ ــ زاوية الميل : ( Declination angle )**

تعرف زاوية الميل ( $\delta$ ) بأنها الزاوية المحصورة بين الأشعة الشمسية والعمودي على المحور القطبي في مستوى الأشعة الشمسية ، وتتراوح قيم ( $\delta$ ) ما بين صفر في ٢١ آذار ( الاعتدال الربيعي ) إلى + ٢٣,٤٥ في ٢٢ حزيران ( الانقلاب الصيفي ) وما بين صفر في ٢٣ أيلول ( الاعتدال الخريفي ) إلى − ٢٣,٤٥ في ٢٢ كانون أول ( الانقلاب الشتوي ) والقيم الشهرية لزاوية الميل ( $\delta$ ) ، معطاة في الجدول ( ٣ ـ ١ ) . [ أنظر الشكل ( ٣ ـ ١٢ ) ] .

**٢ ــ زاوية الارتفاع : ( Altitude angle $\beta_1$ )**

وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع الشمسي والمسقط الأفقي لهذا الشعاع على سطح الأرض عند زاوية خط عرض معين ( L ) .

**٣ ــ زاوية السمت : ( Azimuth angle $\alpha_1$ )**

وهي الزاوية المحصورة بين المسقط الأفقي للشعاع الشمسي وخط اتجاه الجنوب ( Due-south ) مقاسة باتجاه عقارب الساعة عند زاوية خط عرض معين ( L ) .

ويمكن حساب قيم ( $\beta_1$ ) و ( $\alpha_1$ ) من المعادلتين التاليتين :

$$\sin \beta_1 = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \qquad (٣ - ٨)$$

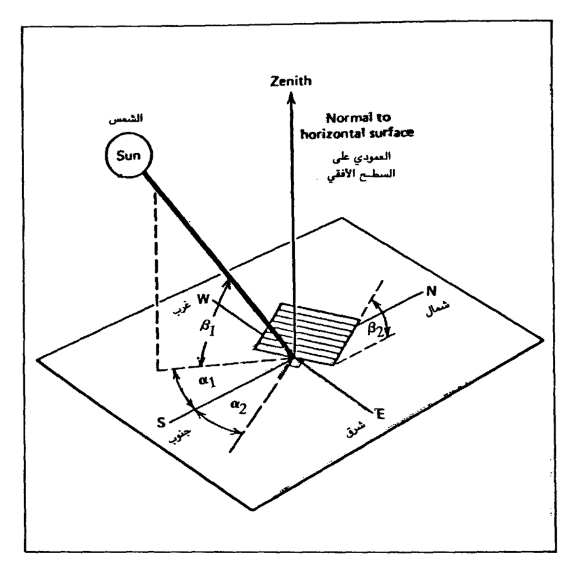
$$\sin \alpha_1 = \frac{\cos \delta \sin H}{\cos \beta_1} \qquad (٣ - ٩)$$

حيث :

L : زاوية خط العرض ( Latitude angle )

H : زاوية الساعة ( Hour angle )

وهي كزاوية السمت قيمتها موجبة بعد الظهر وسالبة قبل الظهر ويمكن




الشكل ( ٣ ـ ١٣ )
الزوايا الشمسية المختلفة

حسابها من المعادلة الآتية :

٠,٢٥ [ عدد الدقائق قبل ( − ) أو بعد ( + ) الظهر للوقت الشمسي الظاهـر
( ٣ ـ١٠ ) H = [ A S T

يبين الملحق رقم (١) قيم كل من ( $\alpha_1$ ) و ( $\beta_1$ ) عند خط عـرض ٤٠ درجة شمالاً .

ولحساب الزاوية Ø المحصورة بين الأشعة الشمسية والعمودي على سطـح

معين فإنه من الضروري تعريف الزوايا الخاصة بهذا السطح شكل ( ٣ ـ ١٣ ) .

١ ــ زاوية السمت للسطح ( $\alpha_2$ ) وهي الزاوية المحصورة بين المسقط الأفقي للعمودي على السطح واتجاه مقاسه باتجاه عقارب الساعة .

٢ ــ زاوية الميل للسطح ( Tilt angle $\beta_2$ ) وهي الزاوية المحصورة بين السطح والمستوى الأفقي .

وتعطى الزاوية ( $\varnothing$ ) بالمعادلة الآتية :

$$\text{Cos } \varnothing = \text{Sin } \beta_1 \text{ Cos } \beta_2 + \text{Cos } \beta_1 \text{ Sin } \beta_2 \text{ Cos } ( \alpha_1 - \alpha_2 )$$

( ٣ ـ ١١ )

إذا كانت قيمة ( $\text{Cos } ( \alpha_1 - \alpha_2 )$ ) سالبة فإن هذا يعني أن الأشعة الشمسية لا تسقط على السطح بشكل مباشر .

## ٣ ـ ٣ ـ ٤ قيم الإشعاع الشمسي :

إن كمية الإشعاع الشمسي الساقطة على سطح معين هي حاصل ضرب الإشعاع المباشر الساقط على سطح معامد للأشعة الشمسية ( $I_{dn}$ ) و ( $\text{Cos } \varnothing$ ) . وتعتمد قيمة الإشعاع العمودي المباشر ( $I_{dn}$ ) على سمك الغلاف الغازي الذي يقطعه الإشعاع بالإضافة إلى كميات بخار الماء والملوثات الموجودة في الجو . ويعبر عادة عن طول المسار الجوي بكتلة الهواء ( m ) التي تعرف بأنها النسبة للكتلة الجوية الموجودة في المسار الفعلي للإشعاع الشمسي المباشر عند موقع معين إلى تلك الكتلة الموجودة في المسار إذا كانت الشمس عمودية على ذلك الموقع ( $\beta_1 = 90°$ ) عند مستوى سطح البحر .

وخارج نطاق الغلاف الغازي للكرة الأرضية فإن ( $m = 0$ ) وفي أي موقع آخر فإن ( $m = 1 / \text{Sin } \beta_1$ ) .

يمكن حساب شدة الإشعاع العمودي المباشر ( $I_{dn}$ ) من المعادلة الآتية :

$$I_{dn} = A\, e^{-( B / \text{Sin } \beta_1 )} \qquad (٣ ـ ١٢)$$

حيث :

A : شدة الإشعاع الشمسي الكوني الظاهر عند ( $W / m^2$ ) $m = 0$

B : معامل الانطفاء الجوي ( $1 / m$ )

يبين الجدول ( ٣ ـ ١ ) القيم الشهرية لكل من ( A ) و ( B ) بينما يبين الملحق رقم (٢) قيم المركبة العمودية المباشرة ( $I_{dn}$ ) للإشعاع الشمسي عند خطوط عرض مختلفة .

ويعطى تدفق الطاقة الشمسية الكلي ( $I_{t\varnothing}$ ) على سطح موجود في نطاق الكرة الأرضية عند أي ميل واتجاه لهذا السطح إذا كانت زاوية السقوط له مقدارها ( $\varnothing$ ) بالمعادلة :

$$I_{t\varnothing} = I_{dn} \cos \varnothing + I_{ds} + I_r \qquad (٣ - ١٣)$$

حيث :

$I_{dn} \cos \varnothing$ : المركبة المباشرة للأشعة الشمسية ( $W / m^2$ )

$I_{ds}$ : المركبة المنتشرة أو المبعثرة للإشعاع الشمسي ( $W / m^2$ )

$I_r$ : الإشعاع قصير ( طول ــ الموجة ) المنبعث من الأسطح الفضائية الأخرى غير الشمس ( $W / m^2$ )

وتعتمد شدة المركبة المباشرة الساقطة على سطح معامد للأشعة الشمسية ( $I_{dn}$ ) على :

١ ــ الوقت من السنة .
٢ ــ الوقت من اليوم.
٣ ــ خط العرض .
٤ ــ الحالة الجوية .

وتعطى قيمة ( $I_{ds}$ )

$$I_{ds} = C\, I_{dn}\, F \qquad (٣ - ١٤)$$

حيث ان ( C ) هي النسبة بين المركبة المبعثرة إلى المركبة المباشرة للأشعة الشمسية الساقطة على سطح أفقي ((الجدول ( ٣ ـ ١ ))، و ( F ) هو معامل الزاوية بين السطح والفضاء، ويمكن حساب قيمة تقريبية لهذا العامل من المعادلة :

$$F = \frac{1 + \cos \beta_2}{2} \qquad (٣ - ١٥)$$

وتعطى كميـة الطـاقـة الشمسيـة ( $E_{t\emptyset}$ ) التـي يمتصهـا سطـح مـعين بالمعادلة :

$$E_{t\emptyset} = I_{t\emptyset} \, \epsilon \qquad (٣ - ١٦)$$

حيث ان ( $\epsilon$ ) هي انبعاثية أو امتصاصية السطـح للإشعاع الشمسي .

يعطي الجدول ( ٣ ـ ٢ ) قيم الامتصاصية لبعض الأسطـح .

| المادة | $\epsilon$ الإشعاع العادي | $\epsilon$ الإشعاع الشمسي |
|---|---|---|
| الطوب والاسمنت المسلح | 0.85 — 0.95 | 0.65 — 0.77 |
| الاسفلت | 0.90 — 0.95 | 0.86 — 0.90 |
| ورق السقوف | 0.85 — 0.95 | 0.85 — 0.90 |
| الالمنيوم | 0.02 — 0.10 | 0.10 — 0.40 |
| النحاس | 0.02 — 0.15 | 0.30 — 0.50 |

**الجدول ( ٣ ـ ٢ )**
**إمتصاصية بعض الأسطـح للإشعاع الحراري**

**مـثـال :**

احسب كميـة الطاقـة الشمسية التي يمتصهـا سطـح إحـدى البنـايـات في الحادي والعشرين من شهر أيار عند الساعـة الثانيـة عشرة ظهـراً إذا كانت هـذه البناية تقـع في مدينة اربد ــ خط عرض ٣٢ شمالاً وخط طول ٣٦ شـرقاً ــ وكـان

السقف يواجه الجنوب ويميل بـزاوية مقدارها ٤٥ درجـة عن العمودي على سطـح الأرض . ( افترض ان السماء صافية )

زاوية خط العرض $L = 33°$

خط الطول Longitude = 36° east

May 21 at 12 noon

زاوية ميل السطـح عن المستوى الأفقي $\beta_2 = 90° - 45° = 45°$

زاوية السمت للسطـح ( $\alpha_2 = 0$ ) لأن السطـح يواجه الجنوب .

لنأخذ خط الطول القياسي ٣٠ شرقاً ( 30 east ) .

إذاً فالوقت الشمسي المتوسط ( M S T )

$$M\,S\,T = 12{:}00 + [\,36 - 30\,]\,0{:}04 = 12{:}24$$

( استعملنا الإشارة + لأن خط الطـول المحلي لمدينـة اربد يقـع ٦ درجـات شرق خط الطول القياسي )

الوقت الشمسي الظاهر ( A S T )

( معادلة الزمن ) $A\,S\,T = M\,S\,T + E\,O\,T$

من الجدول ( ٣ ـ ١ ) في ٢١ أيار

$$\delta = +\,20.3$$

$$A = \frac{350}{0.3173} = 1104\ W / m^2$$

$E\,O\,T = +3.3 \text{ min}$

$B = 0.196 \frac{1}{m}$

$C = 0.121$

$A\,S\,T = 12{:}24 + 3.3 \text{ min} = 12{:}27.3$

زاوية الساعة ( H )

$H = 0.25\,[\,12{:}27.3 - 12{:}00.0\,] = +6.82°$

لاحظ أن الإشارة ( + ) لأن ( A S T ) بعد الظهر .

$\text{Sin}\,\beta_1 = \text{Cos}\,33° \,\text{Cos}\,6.82° \,\text{Cos}\,20.3° + \text{Sin}\,33° \,\text{Sin}\,20.3°$

$\text{Sin}\,\beta_1 = 0.967$

$\beta_1 = 75.92°$

$$\text{Sin}\,\alpha_1 = \frac{\text{Cos}\,20.3° \,\text{Sin}\,6.82°}{\text{Cos}\,75.92°} = 0.4581$$

$\alpha_1 = 27.26°$

$\text{Cos}\,\varnothing = \text{Sin}\,75.92° \,\text{Cos}\,45° + \text{Cos}\,75.92° \,\text{Sin}\,45° \,\text{Cos}\,(\,27.26° - 0°\,)$

$\text{Cos}\,\varnothing = 0.8387$

$I_{dn} = 1104\,e^{-\,0.196\,/\,0.967} = 901.5 \text{ W}/\text{m}^2$

$I_{ds} = C\,I_{dn}\,F$

$$F = \frac{1 + \text{Cos}\,\beta_2}{2} = \frac{1 + \text{Cos}\,45°}{2} = 0.853$$

$I_{ds} = 0.121 \times 0.833 \times 901.5 = 93.1 \text{ W}/\text{m}^2$

$$I_{t\varnothing} = I_{dn} \cos \varnothing = I_{ds}$$

( لاحظ أن $I_r$ قد أهملت )

$$I_{t\varnothing} = 901.5 \times 0.8387 + 93.1 = 849.15 \ W / m^2$$

$$E_{t\varnothing} = \epsilon \ I_{t\varnothing}$$

من الجدول ( ٣ ـ ٢ ) فإن قيمة ( $\epsilon$ ) للاسمنت المسلح هي :

$$\epsilon = \frac{0.65 + 0.77}{2} = 0.1$$

$$E_{t\varnothing} = 0.71 \times 849.15 = 602.9 \ W / m^2$$

**مـثـال :**

احسب مقدار الطاقة الشمسية ــ عند الساعة التاسعة صباحاً في الحادي والعشرين من شهر كانون الثاني ــ التي يمتصها سقف إحدى البنايات المغطى بورق السقوف والذي يميل عن الأفقي بزاوية مقدارها ٤٠° ويواجه الجنوب الشرقي إذا علمت أن هذه البناية تقع على خط عرض ٣٣ شمالاً وخط طول ٨٢ غرباً . ( افترض أن السماء صافية ) .

South east roof $\alpha_2 = -45°$

$L = 33°, \beta_2 = 40°$

من الجدول ( ٣ ـ ١ ) في الحادي والعشرين من شهر كانون الثاني

$\delta = -19.9°, E\,O\,T = -11.2$ min

$$A = \frac{390}{0.3173} = 1230 \ W / m^2, C = 0.058, B = 0.142 \frac{1}{m}$$

أقرب خط طول قياسي ( ٧٥ غرباً )

Nearest Meridian 75 W

( صباحاً )

$$M\,S\,T = 9{:}00 + 0{:}04\,[\,75 - 82\,] = 9 - 0{:}28 = 8{:}32 \text{ A. M.}$$

$$A\,S\,T = 8{:}32 + (\,-0{:}11.2\,) = 8{:}20.2 \text{ A. M.}$$

$$H = [\,8{:}20.2 - 12{:}00\,]\,0.25 = -54.8^\circ$$

$$\sin\beta_1 = \cos 30 \cos(-19.9)\cos(-54.8) + \sin 30 \sin(-19.9) = 0.2992$$

$$\beta_1 = 17.4^\circ$$

$$\sin\alpha_1 \frac{\cos(-19.9)\sin(-54.8)}{\cos 17.4} = -0.805$$

$$\alpha_1 = -53.6^\circ$$

$$\cos\varnothing = \sin 17.4 \cos 40 + \cos 17.4 \sin 40 \cos[-53.6 - (-45)]$$

$$\cos\varnothing = 0.8357$$

$$I_{dn} = 1230\, e^{-(0.142/\sin 17.4)} = 765 \text{ W/m}^2$$

$$F = \frac{1 + \cos 40}{2} = 0.833$$

$$I_{t\varnothing} = I_{dn}\,[\,\cos\varnothing + C\,F\,]$$

$$I_{t\varnothing} = 765\,[\,0.8357 + 0.058 \times 0.883\,]$$

$$I_{t\varnothing} = 678.5 \text{ W/m}^2$$

$$E_{t\varnothing} = \epsilon\, I_{t\varnothing}$$

من الجدول ( ٣ ـ ٢ )

$$\epsilon = \frac{0.85 + 0.9}{2} = 0.875$$

$E_{t\varnothing} = 0.875 \times 678.5 = 593.7\ W / m^2$

**مـثـال :**

احسب مقـدار الطاقـة الشمسيـة التي يمتصهـا الحـائط الغـربـي لإحـدى البنايات الواقعة على خط عرض ٤٥° شمالاً وخط طـول ١١٦° غربـاً إذا كان هـذا الحائط يتكون من الطوب .

احسب هـذه الطاقـة عند السـاعة السـادسـة والنصف مسـاءً في الحـادي والعشرين من شهر أيار ( افترض أن السماء صافية ) .

L = 45°, Longitude 116 West

Time 6:30 P. M. May 21

بما أن الحائط عمودي ، إذاً: Vertical Wall $\beta_2 = 90°, \alpha_2 = 90°$

من الجدول ( ٣ ـ ١ )

$\delta = 20.3°$, E O T = 3.3°

$$A = \frac{350}{0.3173} = 1104\ W / m^2$$

$B = 0.196 \frac{1}{m}$, C = 0.121

M S T = 6:30 + 0:04 ( 120 − 116 ] = 6:46.0 P. M.

A S T = 6:46.0 + 0:3.3 = 6:49.3 P. M.

H = 0.25 [ 6:49.3 − 12:00.0 ] 0.25 ( 409.3 ) = 102.3°

$\text{Sin}\ \beta_1 = \text{Cos } 45 \text{ Cos } 20.3 \text{ Cos } 102.3 + \text{Sin } 45 \text{ Sin } 20.3$

$\beta_1 = 5.59°$

$$\text{Sin}\ \alpha_1 \frac{\text{Cos } 20.3 \text{ Sin } 102.3}{\text{Cos } 5.95} = 0.921$$

$\alpha_1 = 67.12°$

$$Cos\ \varnothing = Sin\ 5.95\ Cos\ 90 + Cos\ 5.95\ Sin\ 90\ Cos\ (67.12 - 90)$$

$$Cos\ \varnothing = 0.97$$

$$I_{dn} = A\ e^{-\ (B / Sin\ \beta_1)}$$
$$= 167.7\ W / m^2$$

$$F = \frac{1 + Cos\ \beta_2}{2} = 0.5$$

$$I_{t\varnothing} = I_{dn}\ (Cos\ \varnothing + C\ F) = 167.7\ (0.917 + 0.121 \times 0.5)$$

$$I_{t\varnothing} = 257.9\ W / m^2$$

من الجدول ( ٣ ـ ٢ )

$$\epsilon = \frac{0.65 + 0.77}{2} = 0.71$$

$$E_{t\varnothing} = \epsilon\ I_{t\varnothing} = 183.1\ W / m^2$$

# ٣ ـ ٤
# التطبيقات العملية للطاقة الحرارية من الشمس

يتم استغلال الطاقة الحرارية من الشمس بشكل مباشر بواسطة المجمعات والمركزات واللواقط الشمسية،وأهم التطبيقات في هذا المجال :

**١ ــ اللواقط الشمسية : ( Solar Collectors )**

وتستخدم هذه اللواقط لتسخين المياه من أجل الاستعمال المنزلي، ويعتبر هذا التطبيق من التطبيقات ذات درجة الحرارة المنخفضة حيث لا تزيد درجة حرارة الماء المسخن عن ١٠٠°س ، ولكن في بعض اللواقط التي تُستخدم مع مركزات ( Concentrators ) فإن درجة الحرارة قد تزيد عن ١٠٠°س .

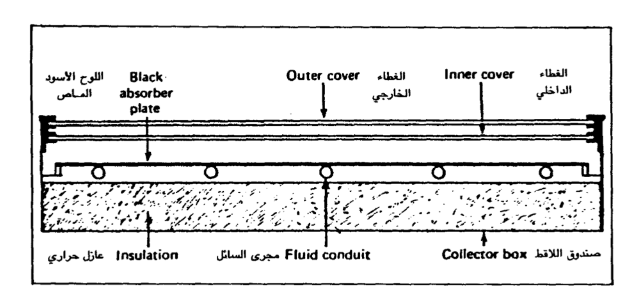
يبين الشكل ( ٣ ـ ١٤ ) أجزاء اللاقط الشمسي الأساسية .

**٢ ــ الأفران الشمسية :**

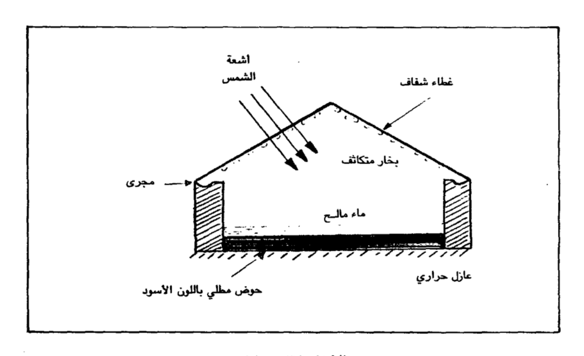
ويمكن بواسطتها الحصول على درجات حرارة مرتفعة تصل إلى ٢٠٠° س أو أكثر وذلك باستعمال المرايا المقعرة والعدسات .

**٣ ــ تحلية وتنقية المياه : ( Water Desalination )**

تمرر المياه المراد تحليتها خلال مجمعات شمسية مغلقة وهذه المجمعات عبارة عن أغطية أو سقوف بلاستكية ( أو غيرها) شفافة، وعند نهاية هذه السقوف المائلة من الأسفل، مجاري ( Troughs ) لتجميع الماء المقطر.أما قاعدة المجمع ( الحوض Basin ) ــ الشكل ( ٣ ـ ١٥ ) ــ فتكون مطلية باللون الأسود الذي يمتص أكثر من ٩٥ ٪ من الأشعة الشمسية، ويكون الماء المالح موجوداً على القاعدة بعمق ( طبقة ) قليل وتكون الأغطية الشفافة ذات درجات حرارة أقل من درجة حرارة سطح الماء، وذلك بسبب عدم امتصاصها للأشعة الشمسية، ولهذا فإن




**الشكل ( ٣ ـ ١٤ )**
**مكونات اللاقط الشمسي**




**الشكل ( ٣ ـ ١٥ )**
**الأجزاء الأساسية لإحدى وحدات تقطير المياه**

المـاء المتبخر ( بخـار الماء ) يتكـاثف على هذه السطـوح الباردة نسبياً، وبسبب وجود الميل فإن الماء المتكاثف يسيل باتجاه القنوات أو المجاري في الأسفل التي تعمل على تجميعه .

**٤ ــ تدفئة وتبريد المباني :**

يعـد هذا التطبيق من أكثر التطبيقات نجاحاً وأكثـرها اقتصـاداً في مجالات استخدام الحرارة الشمسية. في هذا التطبيق يتم بناء مباني خاصة سقوفها مكونة من طبقات بلاستكية لها قابلية تجميـع وتركيز الأشعة الشمسية، وتمر من خلال هذه الطبقـات أنابيب المـاء الذي يسخن ثم ينقـل إلى كافـة أرجاء المنـزل للاستعمـال بصورة مباشرة كماء حار أو للاستعمال من قبل نظم التدفئة ، أما في حالة التبريـد فهناك حاجة إلى توليد قدرة لتشغيل أنظمة التبريد أو تطوير أنظمة كيماوية خاصـة بذلك،ولهذا تعد عملية التبريد أصعب من عملية التدفئة من الناحية التكنولوجية .

**٥ ــ الطباخات الشمسية :**

حيث بالإمكان استعمال مرايا مقعرة بلاستكية لتركيز الأشعـة للحصول على درجات حرارة مرتفعة يمكن استعمالها في الطبخ، وكذلك بـالإمكان استعمـال غرف خاصة ( مُجمعات ) لتجفيف الحبوب والفواكه وأوراق التبـغ .

أما أهم الاستعمالات غير المباشـرة للطاقـة الشمسية فهي استعمـال أشعة الشمس لتوليد بخار الماء أو غيره من السوائل في أنظمة مغلقة حيث يمرر هذا البخار خلال توربينات خاصة تولد طاقة ميكانيكيـة يتم تحويلهـا بواسطـة مولـدات لإنتاج الطاقة الكهربائية. وهنالك الآن مشاريـع كثيرة في العالم لتوليد الطـاقة الكهـربائيـة بهذه الطريقة .

● ● ●

# الفصل الرابع

# إنتاج الطاقة الميكانيكية

# ٤ ـ ١
# تحويل الطاقة الحرارية
# إلى طاقة ميكانيكية

## ٤ ـ ١ ـ ١ محركات دورة رانكن

يبين الشكل ( ٤ ـ ١ ) المكونات الرئيسة لنظام محرك بخاري بسيط، حيث يُبخر السائل في مرجل، ثم يسمح له بالتمدد في ممدد ( Expander ) يُنتج شغلاً ميكانيكياً. ويكون هذا المدد عادة عبارة عن آلة ترددية أوتوربين، وبعد التمدد يعاد البخار إلى المرجل بواسطة مضخة تغذية بعد تكثيفه إلى ماء في المكثف حيث يُصرف جزء بسيط من شغل المدد في تشغيل مضخة التغذية .

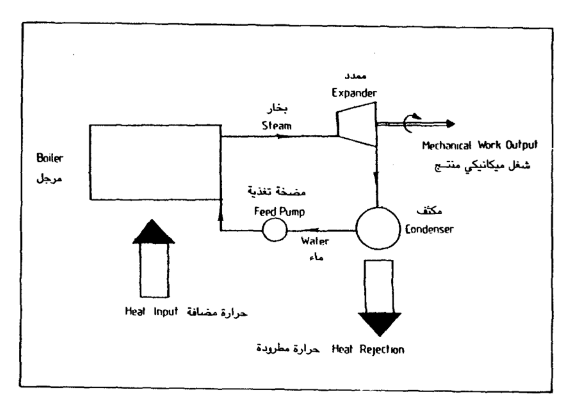
وفي العادة ، فإن الشغل المبذول لتشغيل مضخة التغذية يهمل في حسابات هذه الدورة . ولفهم أداء دورة رانكن البخارية فإنه من الضروري دراسة الحالات ( الأطوار ) المختلفة للبخار .

**١ ـ البخار المشبع : ( Saturated Vapour )**

عند وضع كمية من الماء في وعاء مغلق ومفرغ من الهواء فإن الحيز الخاوي فوق الماء سيمتلىء ببخار الماء .

يعتمد الضغط النهائي الثابت الذي يصل إليه بخار الماء على درجة الحرارة فقط ، ويطلق على البخار في هذه الحالة اسم البخار المشبع وعلى ضغط هذا البخار اسم ضغط البخار المشبع .

عند درجة حرارة الغرفة العادية فإن ضغط البخار المشبع للماء يكون منخفضاً. فعلى سبيل المثال عند درجة حرارة مقدارها ١٥°س يكون ضغط البخار المشبع للماء حوالى ١٧٥٠ نيوتن / م$^{٢}$ أو ما يعادل ٠,٠١٧ ضغط جوي .




**الشكل ( ٤ ـ ١ )**
**المكونات الأساسية لمحرك رانكن البسيط**

عند ازدياد ضغط البخار المشبع فإن كثافة البخار تزداد تبعاً لذلك كما هو مبين في الجدول ( ٤ ـ ١ ) والذي يبين أيضاً العلاقة بين درجة الحرارة وضغط البخار المشبع .

**٢ ـ البخار المحمص : ( Superheated Vapour)**

إذا عزلنا كمية من بخار الماء المشبع عن سطح الماء ورفعنا درجة حرارتها فإن هذه الكمية في البخار تتصرف كالغاز. في هذه الحالة فإن ضغط البخار لا يعتمد فقط على درجة الحرارة ، بل يعتمد أيضاً على حجم الوعاء المحتوي لهذا البخار .

ويطلق على البخار في هذه الحالة اسم البخار المحمص .

**٣ ـ البخار الرطب : ( Wet Vapour )**

إذا بُردت كمية معزولة من البخار المشبع فإن جزءًا من البخار سيكثف وسينخفض الضغط تبعاً لذلك . يعرف الخليط ( المزيج ) الناتج عن عملية

| Temperature °C | Pressure bar | Vapour density kg/m³ | Vapour specific volume, m³/kg |
|---|---|---|---|
| 0·01 | 0·00611 | 0·00485 | 206 |
| 20 | 0·023 | 0·0175 | 57·8 |
| 30 | 0·0424 | 0·0304 | 32·9 |
| 40 | 0·0737 | 0·053 | 19 |
| 60 | 0·199 | 0·13 | 7·7 |
| 80 | 0·474 | 0·29 | 3·4 |
| 100 | 1·01 | 0·625 | 1·6 |
| 120 | 2·0 | 1·14 | 0·88 |
| 150 | 4·8 | 2.56 | 0·39 |
| 200 | 16·0 | 8·13 | 0·123 |
| 250 | 40·0 | 20·4 | 0·049 |
| 300 | 86·0 | 46·3 | 0·0216 |
| 350 | 166 | 115 | 0·0087 |
| 374·15* | 221·20 | 315 | 0·00317 |

*Critical Point
1 bar = $10^5$Pa
1 atm = 1·013 bar

الجدول ( ٤ ـ ١ )
خصائص البخار المشبع

التكثيف الجزئي لبخار الماء باسم البخار الرطب، في حين يطلق اسم كسر الجفاف X ( Dryness fraction ) على نسبة الكتلة للبخار الموجودة في المزيج بحالتها الغازية .

$$\text{كسر الجفاف } ( X ) = \frac{\text{كتلة البخار في الحالة (الطور) الغازية}}{\text{كتلة الخليط الكلية}}$$

للسائل المشبع $X = 0$

للبخار الرطب $0 < X < 1.0$

للبخار المشبع $X = 1.0$

تعـد عملية تسخين سـائل مـا عند ضغط ثـابت عملية هـامة في المحـركات الحرارية ، فعند تسخين كمية من الثلـج عند ضغط جوي فإن هذه الكميـة ستذوب وتتحول إلى ماء عند درجة حـرارة ثابتـة صفر° س ، ثم تبـدأ درجة حـرارة الماء بالارتفاع حتى تصل إلى ١٠٠° س حيث يبدأ المـاء بالتحـول إلى بخار عنـد نفس الـدرجة حتى تتحـول الكمية بـأكملها إلى بخـار ، ثم تبـدأ درجـة حـرارة البخـار بالارتفاع بعد ذلك مـع استمرار عملية التسخين .

تسمى كميـة الحرارة المـزودة أو المكتسبة في عمليـة ما عنـد ضغط ثـابت بالانثالبي. وفي الديناميكا الحرارية يرمز للانثالبـي النوعية ( J / kg ) عادة بالرمز ( h ) ـــ يطلق على الانثالبـي أحياناً اسم المحتوى الحراري ـــ .

تعرف انثالبـي الانصهار أو الحرارة الكامنة لـلانصهار بـأنها كميـة الحرارة اللازمة لتحويل وحدة الكتلة للمادة في حالتها الصلبة إلى حـالتها السائلة، وتعـرف الانثالبي التبخر أو الحرارة الكامنة للتبخر بأنها كمية الحرارة اللازمة لتحويل وحدة الكتلـة للمادة من حـالتهـا السـائلـة إلى حـالتهـا الغـازيـة . الشكـل ( ٤ ـ ٢ أ ) و ( ٤ ـ ٢ ب ) يبيـن حـالات البخـار الثـلاثـة علـى مخططـي درجـة الحـرارة ـــ الأنثالبـي ( T - h ) ودرجة الحرارة ـــ الانتروبيا (T - S) .

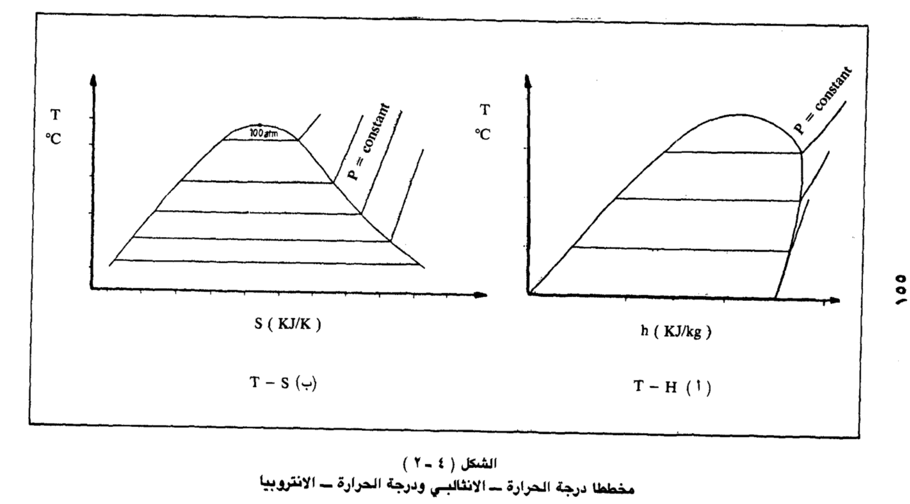
( أ ) المحرك البخاري الترددي :( **Reciprocating steam engine** )

يعتبر المحرك البخاري الترددي واحداً من أقدم المحركات العاملة على دورة رانكن .

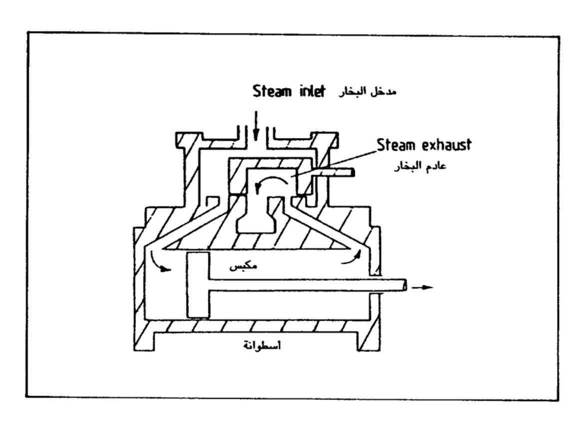
يتكـون هذا المحـرك أساسـاً من اسطوانـة بداخلهـا مكبس يتحرك حـركـة ترددية . يتم إنجاز الشغل في هذا المحرك بفعل حركـة المكبس الترددية الناتجـة عن الفرق في الضغط بين داخل الاسطـوانة ( ضغط البخـار المرتفـع ) وخـارجها ( الضغط الجـوي). الشكل ( ٤ ـ ٣ ) يبين رسمـاً تخطيطياً لممدد مزدوج الحـركة ( Double acting expander ) محرك بخاري ترددي .

(ب) التـوربين البخاري :

كما هو مبين في الشكل ( ٤ ـ ٤ ) فإن الأجزاء الرئيسـة للتوربين البخـاري هي المرجل والتـوربين والمكثف ومضخة التغـذية ، أمـا الدورة الثيـرموديـناميكية فتضم الإجراءات المثالية التالية :




الشكل ( ٤ ـ ٢ )
مخططا درجة الحرارة ـ الانثالبي ودرجة الحرارة ـ الانتروبيا




الشكل ( ٤ ـ ٣ )
ممدد مزدوج الحركة

١ ـ ( $1 \rightarrow 2$ ) انضغاط ايزونتروبي ( $\Delta S = 0$ ) في المضخة يتطلب شغلاً مقداره ( $W_p$ ) .

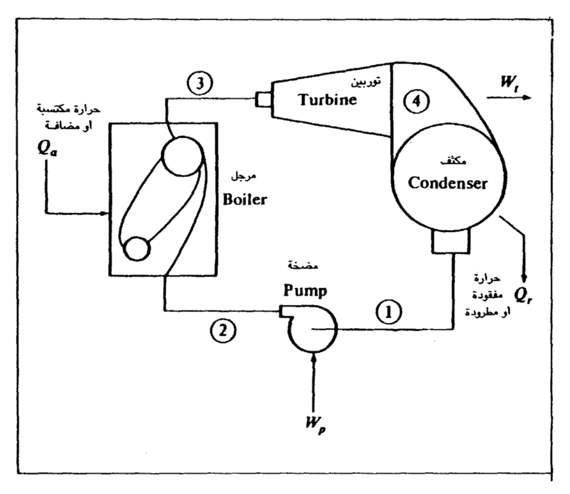
٢ ـ ( $2 \rightarrow 3$ ) اكتساب حرارة من الوسيط العامل في المرجل مقدارها ( $q_a$ ) .

٣ ـ ( $3 \rightarrow 4$ ) تمدد ايزونتروبي في التوربين يُنتج شغلاً مقداره ( $W_t$ ) .

٤ ـ ( $4 \rightarrow 1$ ) فقد حرارة في المكثف عند ثبات الضغط مقدارها ( $q_r$ ) .

وهذه الإجراءات المثالية ( ايزونتروبية ) الأربعة مبينة على مخطط (T - S) ( الشكل ( ٤ ـ ٥ ) ) .

وتسمى الدورة الثيرموديناميكية المكونة من هذه الإجراءات بدورة رانكن. وكما هو مبين في الشكل ( ٤ ـ ٥ ) هناك حالتان لهذه الدورة :




الشكل ( ٤ ـ ٤ )
الأجزاء الرئيسة ( دورة رانكن )

١ ـ اكتساب البخار للحرارة في المرجل حتى يصل إلى درجة الإشباع فقط ( $3'$ ) وفي هذه الحالة فإن الدورة هي ( $1\ 2\ 3'\ 4'$ ) .

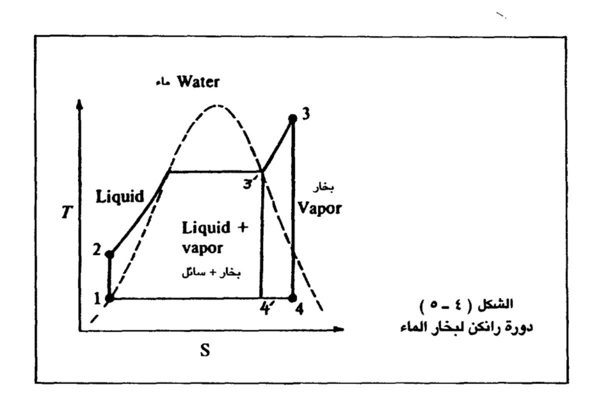
٢ ـ اكتساب الحرارة في المرجل حتى يصل البخار إلى درجة التحميص ( 3 ) وفي هذه الحالة فإن الدورة هي ( 1 2 3 4 ) .

شغل التوربين :

$$W_t = h_3 - h_4 \text{ or } W_t = h_{3'} - h_{4'} \qquad (٤ - ١)$$

شغل المضخة ( اللازم لتشغيل المضخة ) :

$$W_p = h_2 - h_1 \simeq v_1 ( p_2 - p_1 ) \qquad (٤ - ٢)$$




الشكل ( ٤ ـ ٥ )
دورة رانكن لبخار الماء

حـيـث :

$v_1 = 1/\rho_1$ : الحجم النوعي للسائل ( م٣ / كغم ) .

$\rho_1$: كثافة السائل ( كغم / م٣ ) .

$P$ : الضغط ( نيوتن/م٢ ).

الشـغل الصـافي :

$$W_n = W_t - W_p = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \qquad (٤ - ٣)$$
$$= (h_3 - h_4) - v_1 (p_2 - p_1)$$

الكفـاءة الحـرارية :

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_a} \qquad (٤ - ٤)$$

أو :

$$\eta_{th} = \frac{h_1 - h_2 + h_3 - h_4}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} \qquad (٤ - ٥)$$

بإهمال شغل المضخة ( $W_p$ ) :

$$W_n = h_3 - h_4 \qquad (٤ - ٦)$$

$$\eta_{th} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_2} \qquad (٤ - ٧)$$

**مثـــال :**

في دورة رانكن بسيطـة كان أقصى ضغط وأقصى درجـة حرارة في الـدورة هما ٧٠ بار و ٥٤٠°س وأقـل ضغط في الدورة هـو ٠,١ بار .بـافتراض أن جميع الإجراءات مثالية ( أيزونتروبية ) .

وأن :

( $h_1 = 191.8$ KJ /kg ) و ( $h_3 = 3507$ KJ /kg ) و ( $h_4 = 2389$ KJ /kg )

و ( $v_1 = 0.101 * 10^{-2} \frac{m^3}{kg}$ ) .

احسب :

١ ــ شـغل التـوربين .

٢ ــ شـغل المضخـة .

٣ ــ الشـغل الصـافي .

٤ ــ الحـرارة المكتسبـة .

٥ ــ الحـرارة المفقـودة .

٦ ــ الكفاءة الحرارية للدورة .

1 — $W_t = h_3 - h_4 = 3507 - 2389 = 1118$ KJ / kg

2 — $W_p = v_1 ( p_2 - p_1 ) = 0.101 * 10^{-2} \frac{m^3}{kg}$

$$( 70 - 0.1 ) * 10^5 \frac{N}{m_2} * \frac{1}{1000} = 7.06 \frac{KJ}{kg}$$

3 — $W_n = W_t - W_p = 1118 - 7.06 = 1110.94$ KJ / kg

4 — $q_a = h_3 - h_2$

$h_2 = h_1 + v_1 ( p_2 - p_1 ) = 191.8 + 7.06 = 198.86$ KJ / kg

$q_a = 3507 - 198.86 = 3308.14$ KJ / kg

5 — $q_r = h_4 - h_1 = 2389 - 191.8 = 2197.2$ KJ / kg

6 — $\eta_{th} = \dfrac{W_n}{q_a} = \dfrac{1110.94}{3308.14} = 0.336$

يُستخدم الماء كوسيط عامل في دورات القدرة البخارية ( دورات رانكن ) في أغلب الأحيـان ولكنه بـالإمكان استخـدام موائـع أخـرى كالـزئبق والبـوتـاسيـوم والصوديوم والأمونيا وبعض المركبات العضوية .

يمكن تعديل دورة رانكن البسيطة وذلك بـإعادة تسخين البخـار في المرجـل بعد تمدد جزئي في التوربين إلى نفس درجة حرارته السابقة قبل انتهـاء التمدد ثم يعـاد بعـد ذلـك إلى التـوربين لإكمـال عمليـة التمـدد كمـا هـو مبين في الشكـل ( ٤ ـ ٦ ) .

الإجراءات المثالية لدورة إعـادة التسخين مبينة في الشكـل ( ٤ ـ ٧ ) على مخطط T - S حيث ان الإجراء ( 5 → 4 ) هو إجراء إعادة التسخين .

شغل التوربين :

$$W_t = ( h_3 - h_4 ) = ( h_5 - h_6 ) \qquad (٤ ـ ٨)$$

شغل المضخة :

$$W_p = ( h_2 - h_1 ) \qquad (٤ ـ ٩)$$

الشـغل الصـافي :

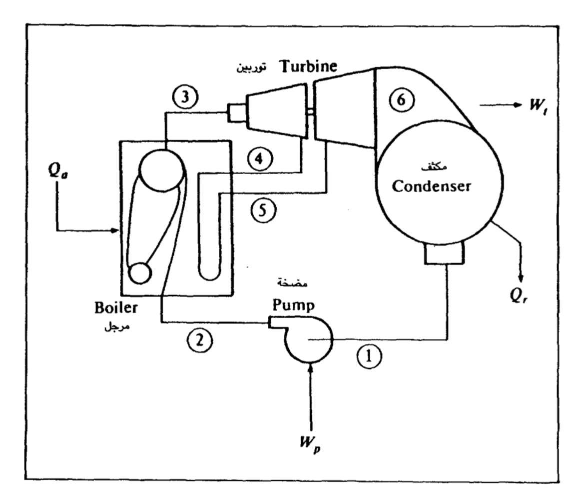
$$W_n = W_t - W_p = h_1 + h_3 + h_5 - h_2 - h_4 - h_6 \qquad (٤ ـ ١٠)$$

أو :

$$W_n = h_3 + h_5 - h_4 - h_6 - v_1 ( P_2 - P_1 ) \qquad (٤ ـ ١١)$$

الكفـاءة الحـرارية :

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_a} = \frac{h_1 + h_3 + h_5 - h_2 - h_4 - h_6}{h_3 + h_5 - h_2 - h_4} \qquad (٤ ـ ١٢)$$

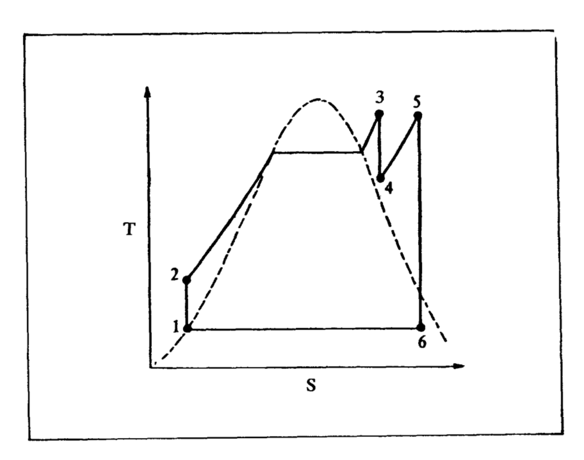



**الشكل ( ٤ ـ ٦ )**
**دورة إعادة التسخين ( Reheat Rankine Cycle )**

أو :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_3 + h_5 - h_2 - h_4} \qquad (\text{٤ ـ ١٣})$$

**في دورات رانكن الحقيقية هناك ضياعات أو فواقد لا إرجاعية تحدث في كل من إجراء الانضغاط في المضخة وإجراء التمدد في التوربين تؤدي إلى تحويل جزء من الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حرارية وبالتالي زيادة قيم الانثالبي عند مخرجي المضخة والتوربين كما هو مبين في الشكل ( ٤ ـ ٨ ) على مخطط**




**الشكل ( ٤ ـ ٧ )**
**دورة إعادة التسخين على مخطط ( T-S )**

( T - S ) . وكمـا نلاحظ من الشكـل فإن الإجـراءات الحقيقية ( غيـر المثـاليـة ) يصاحبها زيادة في قيم الأنتروبيا ( S ) .

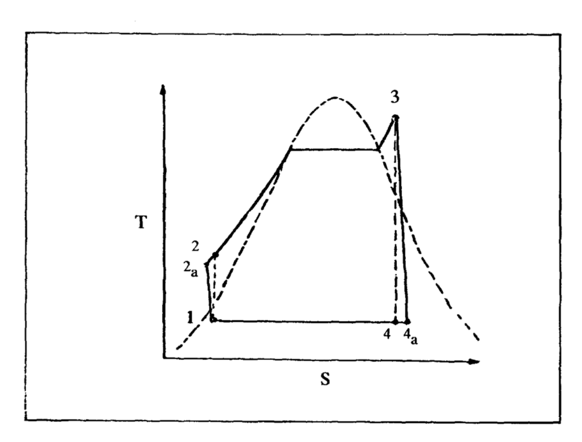
الشغل الحقيقي للتوربين :

$$W_{ta} = h_3 - h_{4_a} \qquad (٤ - ١٤)$$

$$= \eta_t ( h_3 \quad h_4 )$$

الشغل الحقيقي اللازم لتشغيل المضخة :

$$W_{pa} = h_{2a} - h_1 = \frac{h_2 - h_1}{\eta_p} \qquad (٤ - ١٥)$$




**الشكل ( ٤ ـ ٨ )**
**دورة رانكن البسيطة الحقيقية**
**على مخطط T-S ( $1\ 2_a\ 3\ 4_a$ )**

أو :

$$W_{pa} \simeq \frac{v_1 (P_2 - P_1)}{\eta_p} \qquad ( ٤ - ١٦ )$$

حـيث :

$\eta_t$ : كفـاءة التـوربين .

$\eta_p$ : كفـاءة المضخـة .

يمكن زيادة كفاءة دورة رانكن البسيطة وذلك بزيادة درجة الحرارة القصـوى ( $T_3$ ) للبخـار وزيـادة الضغط الأقصى ( ضغط المـرجـل $P_3$ ) وتخفيض الضغط الأدنى ( ضغط المكثف $P_4$ ) في الدورة. كمـا أن زيـادة درجـة حـرارة التحميص

( Super heat ) للبخار تؤدي إلى زيادة الشغل النوعي المنتـج ( Specific work out put ) وتقليل المحتوى الرطوبـي للبخار في عادم التوربين .

في الواقـع العملي فإن درجة الحرارة القصوى للدورة تكون محدودة بـدرجة تحمـل المواد المعـدنيـة التي يصنـع منهـا كـل من المحمص ( Super heater ) ومدخل توربين الضغط المرتفـع .

وتستخدم التوربينات البخارية الحديثة درجات حرارة قصوى تتراوح ما بين ٥٣٨ ــ ٥٩٥°س .

## ٤ ـ ١ ـ ٢ المحركات العاملة على الغاز :

يكون الوسيط العامل في هذه المحركات عبارة عن غاز ، وسنتعرف هنـا إلى ثلاث محركات عاملة على الغاز :

١ ــ محـرك ستيرلنـغ .

٢ ــ التوربين الغازي ذو الدورة المغلقـة .

٣ ــ التوربين الغازي ذو الدورة المفتوحة .

**١ ــ محرك ستيرلنـغ : ( Stirling engine )**

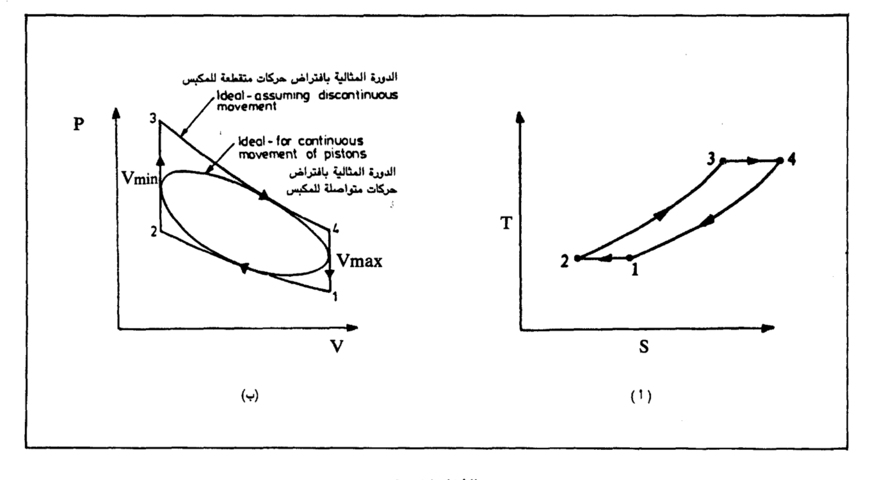
يعتبر محرك ستيرلنـغ محركاً حرارياً له حسنات وسيئات أي محـرك حراري آخر ويمكن تشغيله باستخدام مصادر حرارة مختلفة كاللهب المبـاشر النـاتـج عن حـرق البترول أو الغـاز أو الخشب أو الفحم الحجـري وبـالإمكـان تشغيلـه أيضـاً بالطاقة الشمسية أو النووية .

الشكل ( ٤ ـ ٩ أ ) و ( ٤ ـ ٩ ب ) يبين دورة ستيرلنـغ المثالية على مخططي ( P - V ) و ( T - S ) . وإجراءات هذه الدورة هي :

( $2 \rightarrow 3$ ) تسخين الغـاز ( الوسيط العـامـل ) عنـد حجم ثـابت Vmin إلى درجة حرارة مرتفعة مقدارها $T_3$ وضغط مرتفـع مقداره $P_3$ .

( $3 \rightarrow 4$ ) تمدد الغاز عند درجة حـرارة ثابتـة ( $T_3$ ) إلى الحجم الأقصى Vmax ، وينتـج خلال هذا التمدد شغل خارجي .

( $4 \rightarrow 1$ ) تبـريـد الغـاز عنـد حجم ثـابت إلى درجـة حـرارة منخفضـة مقدارها $T_1$ .




**الشكل ( ٤ ـ ٩ )**
**دورة ستيرلنـغ المثالية**
**على مخططي ( P-V ) و ( T-S )**

( 2 → 1 ) انضغاط الغاز عند درجة حرارة ثابتة إلى الحجم الأدنى Vmin .

إن هذه الإجراءات يمكن أن تتم باستخدام ترتيب مكون من مكبس وأسطوانة وملف تسخين مثلاً ، وفي هذه الحالة فإن المكبس ينجز شغلاً خارجياً عند تمدد الغاز نتيجة لاكتسابه الحرارة من ملف التسخين .

الشكل ( ٤ ـ ١٩ أ ) يبين أيضاً دورة ستيرلنغ المثالية ( المنحنى بيضوي الشكل ) في حالة الحركة المستمرة للمكبس ، ويكون الشغل المنجز مساوٍ للمساحة المحصورة داخل المنحنى البيضوي .

يعطي الشغل المنجز في دورة ستيرلنغ المثالية بالمعادلة :

$$W_n = q_h - q_c \qquad (٤ - ١٧)$$

والكفاءة :

$$\eta_s = \frac{W_n}{q_h} = \frac{q_h - q_c}{q_h} = 1 - \frac{q_c}{q_h} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \qquad (٤ - ١٨)$$

حيث :

$q_h$ : الحرارة المضافة للدورة من المصدر الخارجي الساخن .

$q_c$ : الحرارة المفقودة من الدورة للمصدر الخارجي البارد .

وكما نلاحظ فإن الكفاءة النظرية لهذه الدورة هي نفس كفاءة دورة كارنوت. تقاس الطاقة المتولدة / دورة بمقدار المساحة داخل المنحنى على مخطط ( P - V ) ، وفي محركات ستيرلنغ المستخدمة في الحياة العملية فإن مقدار هذه الطاقة / دورة يمكن زيادتها بشكل كبير وذلك برفع قيمة الضغط المتوسط ( Mean pressure ) العامل في الدورة ، وآلات ستيرلنغ الحديثة تستخدم ضغوطاً متوسطة مرتفعة ، وقد يصل الضغط المتوسط العامل إلى ١٠٠ بار أو أكثر .

ويمكن أيضاً تحسين كفاءة محرك ستيرلنغ باستخدام وسيط عامل له موصلية حرارية عالية مثل الهيدروجين والهيليوم بدلاً من الهواء، ولكن المشكلة في

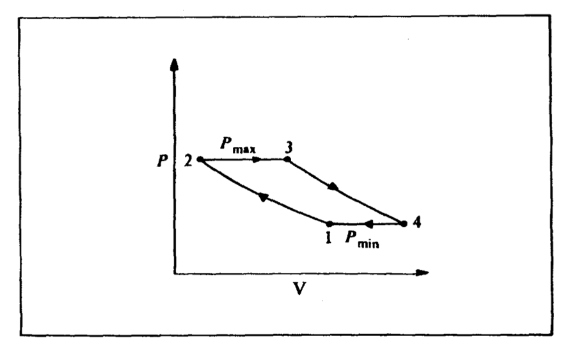
استخدام هذه الغازات أنها ذات تكاليف مرتفعة، ذلك لأن استخدامها يتطلب توافر نظام محكم الإغلاق لمنع تسرب الغاز من أجزاء المحرك المختلفة، في حين أن هذه المشكلة ليست ذات أهمية في حالة استخدام الهواء حيث انه بالإمكان تعويض كمية الهواء المتسربة باستخدام ضاغط بسيط .

مما يجدر ذكره أن هناك دورة تسمى دورة أريكسون لها كفاءة مساوية لكفاءة دورة كارنوت. وتختلف هذه الدورة عن دورة ستيرلنغ بأن الإجراءين ( $1 \rightarrow 4$ ) و ( $3 \rightarrow 2$ ) يتمّان عند ثبات الضغط بدلاً من ثبات الحجم كما هو مبين في الشكل ( ٤ ـ ١٠ ) .

ولكن استخدام محرك حراري يعمل على دورة أريكسون يعد عملية غير مجدية من الناحية العملية، وذلك لأنه من الصعب اكتساب وفقد الحرارة عند ثبات الضغط خلال مرور الغازات العاملة في التوربين والضاغط .

**خصائص محرك ستيرلنغ:**

تصمم محركات ستيرلنغ بقدرات مختلفة ، فقد تكون هذه القدرات صغيرة




**الشكل ( ٤ ـ ١٠ )**
**دورة اريكسون المثالية على مخطط ( P-V )**

جـداً ( Few watts ) ، وقد تصـل إلى قيم مـرتفعـة تتـراوح مـا بين ٤٠٠ ــ ٥٠٠ حصان ( 400 - 500 hp ) في بعض التطبيقات .

يمتاز محرك ستيرلنـغ الذي يستخدم الهيليوم كـوسيط عامـل بأدائـه العالي وضغطـه المرتفـع ودرجـة حرارتـه العاملـة المرتفعـة التي تصـل إلى ٧٠٠°س ، وتكـون نسب القدرة / الـوزن والقدرة / الحجم والفعـالية لهـذا المحرك مشـابهة لمحرك ديزل ينتـج نفس القدرة .

وتشمل الصفات العامة لمحرك ستيرلنـغ ما يلي :

١ ــ يعتبر وحدة محكمة الإغلاق مما يسهل عمليـة التزييت ويقلـل متطلبات الصيانة ويعطي عمـراً أطول للمحـرك . وهناك عـامل آخـر يساهم في إطالة عمر المحرك وهو خلوه من الصمامات .

٢ ــ إمكانية تشغيله باستخدام أنواع مختلفة من الوقود .

٣ ــ انخفاض نسبة الغازات العادمة الملوثة للجو التي يولدها المحرك وذلك بسبب استمـرارية الاحتراق، بعكس محرك الاحتـراق الداخلي الـذي تكون عملية الاحتراق فيه متقطعة.

٤ ــ عدم تغير العزم كثيراً مـع تغيـر السرعـة حيث يحافظ العـزم على قيم مرتفعة نسبياً عند السرعات العالية مما يشجـع على استخدام المحرك كبـديل لمحـرك الاحتـراق الـداخلي في بعض التطبيقـات التي تتطلب عزوماً مرتفعة كآلات الجر .

٥ ــ انخفاض مستوى الضجـة والاهتزازات في محـركات ستيـرلنـغ وذلك لغياب الانفجار النـاتـج عن الاحتراق المفـاجيء ( في شوط القـدرة ) في الأسطـوانة كمـا يحدث في محـرك الاحتراق الـداخلي وانخفـاض الضجة في العادم بـالإضافـة إلى أن عدم وجـود الصمامـات يساهم أيضاً في تقليل الضجة .

التطبيقات العملية لمحركات ستيرلنـغ :

على الرغم من أن فكرة المحرك قديمة إلّا أنه أصبح يحظى بالاهتمام الزائد حديثاً ، ويستخدم هذا المحرك في التبريد ولكن بشكل غير تجاري ، ولعل أداءه الذي يضاهي أداء محرك الديزل مع امتيازه عنه بهدوئه النسبي وانخفاض مستويات التلوث يكسبه المزيد من الأهمية في الكثير من التطبيقات العملية. وهناك اتجاه حديث لإنتاج محركات ستيرلنغ بقدرات تصل إلى ١٠٠٠ حصان بسرعات بطيئة لاستخدامها في النقل البري والبحري الثقيل ، وهناك إمكانية واسعة لاستخدام محركات ستيرلنغ بقدرات تصل إلى ١٥ كيلوواط لتوليد الكهرباء في الدول النامية وذلك باستغلال الفحم الحجري أو أخشاب الأشجار كوقود لهذه المحركات .

## ٢ ـ التوربين الغازي ذو الدورة المغلقة :

يعمل التوربين الغازي على دورة ذات نظام احتراق خارجي. ومبدأ عمل التوربين الغازي يشبه إلى حد كبير مبدأ عمل التوربين البخاري المشروح سابقاً مع وجود فرق واحد وهو أنه في حالة التوربين الغازي فإن الغاز الذي يتم تبريده بعد تمدده في التوربين يبقى في حالته الغازية ولإعادته إلى المُسخن وهو في حالته الغازية فإن ذلك يتطلب شغلاً كبيراً جداً ( أكبر بكثير من الشغل المطلوب من مضخة الماء في التوربين البخاري ) للضاغط .

يعمل التوربين الغازي ذو الدورة المغلقة على دورة برايتون. والإجراءات المثالية لهذه الدورة مبينة في الشكل ( ٤ ـ ١١ أ ) و( ٤ ـ ١١ ب ) على مخططي ( P - V ) و ( T - S ) وهي :

( $1 \rightarrow 2$ ) انضغاط أيزونتروبي في الضاغط .

( $2 \rightarrow 3$ ) اكتساب الحرارة إرجاعياً ( إنعكاسياً ) عند ثبات الضغط .

( $3 \rightarrow 4$ ) تمدد الوسيط العامل أيزونتروبيا ( $\triangle S = 0$ ) .

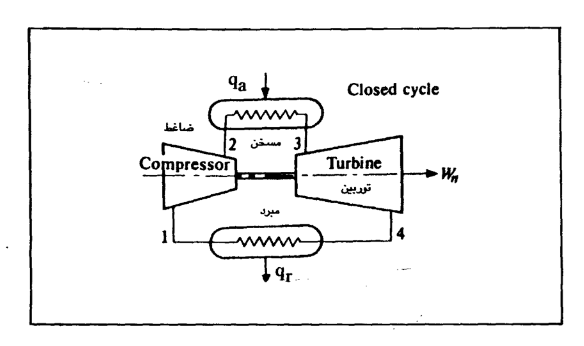
( $4 \rightarrow 1$ ) فقد الحرارة إرجاعياً عند ثبات الضغط .

الشكل ( ٤ ـ ١٢ ) يبين المكونات الرئيسة للتوربين الغازي ذي الدورة المغلقة وهي على الترتيب : الضاغط (١) المسخن ( مبادل حراري ) (٢) والتوربين (٣) والمبرد ( مبادل حراري ) (٤) .

(أ)

(ب)

الشكل ( ٤ ـ ١١ )
دورة برايتون المثالية على مخططي ( P-V ) و ( T-S )




الشكل ( ٤ ـ ١٢ )
المكونات الأساسية للتوربين الغازي ذي الدورة المغلقة

إن اكتساب الحرارة في الإجراء ( $2 \rightarrow 3$ ) يؤدي إلى زيادة في حجم الغاز مما يؤدي بدوره إلى زيادة في الشغل المنجز خلال تمدد الغاز في التوربين وهذه الزيادة هي التي تعطي الشغل الصافي المنجز للدورة .

من دورة برايتون المثالية نجد أن :

الحرارة المكتسبة في الدورة :

$$q_a = \dot{m}\, C_p\, (T_3 - T_2) \qquad (٤ ـ ١٩)$$

الحرارة المفقودة من الدورة :

$$q_r = \dot{m}\, C_p\, (T_4 - T_1) \qquad (٤ ـ ٢٠)$$

حيث :

$\dot{m}$ : معدل تدفق الكتلة للغاز ( kg / s ) .

$C_p$ : الحرارة النوعية للغاز عند ثبات الضغط ( kJ / kg. k ) .

وبتطبيق القانون الأول في الثيرموديناميك فإن الشغل الصافي المنجز :

$$W_n = q_a - q_r \qquad (٤ - ٢١)$$

الكفاءة الحرارية للدورة :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_r}{q_a} = 1 - \frac{\dot{m}\, C_p\,( T_4 - T_1 )}{\dot{m}\, C_p\,( T_3 - T_2 )} \qquad (٤ - ٢٢)$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \qquad (٤ - ٢٣)$$

$$= 1 - \frac{T_1 \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

بما أن إجراءِي الانضغاط والتمدد أيزونتروبيين :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \qquad (٤ - ٢٤)$$

و

$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \qquad (٤ - ٢٥)$$

إذاً :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \qquad (٤ - ٢٦)$$

من المعادلتين ( ٤ ـ ٢٣ ) و ( ٤ ـ ٢٦ ) نجد أن :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \qquad (٤ - ٢٧)$$

أو :

( ٤ ـ ٢٨ )

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}}$$

$$= 1 - ( r_p )^{\frac{1 - \gamma}{\gamma}}$$

حـيـث :

$r_p = P_2 / P_1$ : نسبة الانضغاط في الضاغط .

$\gamma$ : الأس الأيزونتروبـي للغاز ( الوسيط العامل ) وللهـواء فإن ( $\gamma = 1.4$ ) .

بـمـا أن :

( ٤ ـ ٢٩ )

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma - 1}$$

فإنه يمكن كتابة المعادلة ( ٤ ـ ٢٨ ) على النحو :

( ٤ ـ ٣٠ )

$$\eta_{th} = 1 - ( r_v )^{1 - \gamma}$$

حـيـث :

$r_v = v_1 / v_2$ نسبة الحجوم في الضاغط .

من الغـازات الشائـع استخـدامها في التـوربينـات الغـازيـة ذات الـدورات المغلقة، الغازات الخاملة كـالهيليوم والنيـون والآرغـون حيث ان هـذه الغازات ذات قيم عالية لـلأس الأيزونتـروبـي ( $\gamma$ ) مقارنـة مـع الأس الأيزونتـروبـي للهواء مما يساهم في رفـع كفاءة الدورة . وتزداد كفاءة الدورة أيضاً بزيادة درجـة حرارة الغاز الداخل للتوربين ( $T_3$ ) ، وقد أصبـح بالإمكـان تشغيل التـوربينات الغـازية بـدرجات حـرارة دخول ( $T_3$ ) تصـل إلى ١٥٠٠°س ويعود ذلـك إلى التطـورات الكبيرة التي طرأت على المواد التي تصنـع منها ريش التوربين والتي تضم سبائك مقاومة لدرجات الحرارة المرتفعة .

### ٣ ـــ التوربين الغازي ذو الدورة المفتوحة :

في التـوربين الغازي ذي الـدورة المفتوحـة فإن الـوسيط العامـل هو الهـواء الجوي في الضاغط الذي يتحول إلى غازات محترقة ( ثاني أكسيد الكربون + بخار الماء + هواء ) في الحارقة قبل دخوله للتوربين.ويتم فقد الحرارة ( $q_r$ ) إلى الجـو مباشرة وليس هناك حاجة لوجود مبادل حراري ( مُبرد ) كما هو الحال في التوربين ذي الدورة المغلقة . وهكـذا ، فإن الغـاز العـادم ( نـواتـج الاحتـراق ) يطـرد من التـوربين بعد عمليـة التمدد إلى الجـو ، أي أن الوسيط العـامل يتجـدد ( يتغير ) باستمرار ولا يعاد للعمل مرة أخرى كما هو الحال في الدورة المغلقة .

ويستعمل هذا التوربين في الطائرات النفاثة ، حيث ان جزءًا من عملية التمدد يتم في الفوهة ( Nozzle ) ، التي تلي التوربين مباشرة ، وكذلـك يستعمل تـوربين الدورة المفتوحة في محطات توليد الكهـرباء خصـوصاً في حـالات الحمل الأقصى ( Peak - Load ) وذلـك بسبب السرعـة العاليـة التي يمكن بواسطتهـا الوصـول لإنتاج الحمل الأقصى بواسطة هذا التوربين .

ولعل أهم ميزة لتوربين الدورة المفتـوحة على تـوربين الدورة المغلقـة تتمثل في انتقال الحرارة. حيث انه ليس هناك حاجة لوجود مبرد كما هي مبين في الشكـل ( ٤ ـ ١٣ ) .

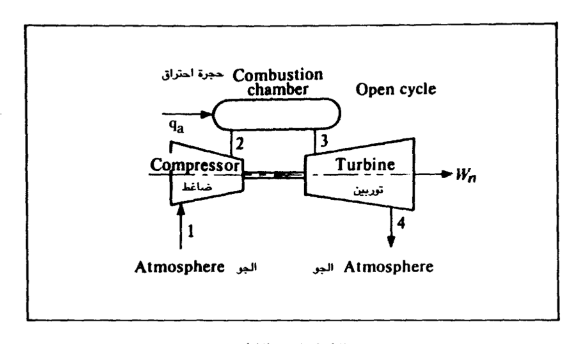
الإجـراءات المثاليـة لدورة التـوربين الغازي ذي الدورة المفتوحـة مبينة في الشكل ( ٤ ـ ١٤ ) على مخطط ( T-S ) .

**مثـــال :**

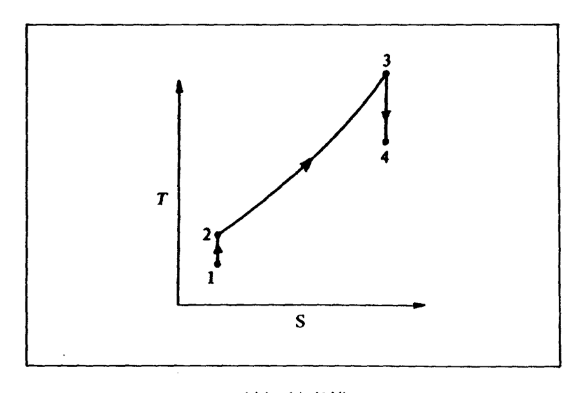
في دورة برايتون مثالية لتـوربين غازي ذي دورة مغلقـة كان الضغط ودرجـة الحـرارة في بـدايـة عمليـة الانضغـاط ( $P_1 = 0.965$ bar ) و ( $T_1 = 15$ C° ) وكـانت نسبة الانضغـاط ( $r_p = 6$ ) وكانت أقصى درجـة حرارة للـدورة ( $T_3 = 961$ K ) .

احـســب :

١ ـــ كفـاءة الـدورة .
٢ ـــ الحرارة المكتسبة في الدورة .
٣ ـــ الشغل الصافي المنجز في الدورة .




الشكل ( ٤ ـ ١٣ )
التوربين الغازي ذو الدورة المفتوحة




الشكل ( ٤ ـ ١٤ )
الدورة المثالية للتوربين الغازي
ذي الدورة المفتوحة على مخطط ( T-S )

افترض أن ( $\gamma = 1.40$ ) ، وأن ( $C_p = 1.005 \frac{KJ}{kg.K}$ ) للهواء .

$$1 — \eta_{th} = 1 - (r_p)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 1 - (6)^{\frac{1-1.4}{1.4}} = 0.4 = 40\ \%$$

$$2 — \frac{T_2}{T_1} = (r_p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \Rightarrow T_2 = T_1 (r_p)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$= (15 + 273)(6)^{\frac{0.4}{1.4}} = 480.5\ K$$

$$\frac{q_a}{\dot{m}} = C_p (T_3 - T_2) = 1.005 (961 - 480.5)$$

$$= 241.5\ KJ / kg$$

$$3 — \frac{W_n}{\dot{m}} = q_a \times \eta_{th}$$

$$= 241.5 \times 0.4 = 96.6\ KJ / kg.$$

**مثـــال :**

محطة توربينيـة غازيـة تولّـد قدرة مقـدارهـا ٢٠ ميغاواط ( 20 MW ) في ظروف التشغيل الآتية :

درجة حرارة الهواء الداخل للضاغط = ٢٠°س وضغطة = ٤,٢ بار .

درجة حرارة الغاز الداخل للتوربين = ٨٥٠°س .

بافتراض أن الأس الأيزونتروبـي للهواء ( $\gamma = 1.4$ ) .

وأن الحرارة النوعية عند ثبات الضغط للهواء ( $C_p = 1.005 \frac{KJ}{kg.K}$ ) .

أوجـد :

١ ـــ درجات الحرارة عند كل نقطة من نقاط الدورة .

٢ ـ الشغل المنجز لكل كغم من الغاز العامل ( الشغل النوعي ) .

٣ ـ الشغل النوعي لكل من الضاغط والتوربين .

٤ ـ الكفاءة الحرارية .

٥ ـ معدل تدفق الكتلة للغاز العامل في الدورة .

١ ـ

$$T_1 = 20 + 273 = 293 \text{ K}$$

$$T_3 = 850 + 273 = 1123 \text{ K}$$

$$T_2 = T_1 = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 293\left(\frac{4.2}{0.98}\right)^{\frac{0.4}{1.4}} = 444.1 \text{ K}$$

$$T_4 = T_3 \frac{T_1}{T_2} = 1123 \times \frac{293}{444.1} = 740.9 \text{ K}$$

٢ ـ

$$\frac{q_a}{\dot{m}} = C_p (T_3 - T_2) = 1.005 (1123 - 444.1)$$

$$= 682.3 \text{ KJ / kg}$$

$$\frac{q_r}{\dot{m}} = C_p (T_4 - T_1) = 1.005 (740.9 - 293)$$

$$= 450.14 \text{ KJ / kg}$$

$$\frac{W_n}{\dot{m}} = \frac{q_a}{\dot{m}} - \frac{q_r}{\dot{m}} = 232.16 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

٣ ـ

$$\frac{W_c}{\dot{m}} = C_p (T_2 - T_1) = 1.005 (444.1 - 293)$$

$$= 151.86 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\frac{W_t}{\dot{m}} = C_p (T_3 - T_4) = 1.005 (1123 - 740.9) = 384.01 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

٤ ـ

$$\eta_{th} = \frac{W_n}{q_a}$$

$$= \frac{232.16}{682.3} = 0.34$$

أيضاً :

$$\frac{W_n}{\dot{m}} = \frac{W_t}{\dot{m}} - \frac{W_c}{\dot{m}} = 384.01 - 151.86 = 232.15 \frac{KJ}{kg}$$

٥ ـ

$$\dot{m} = \frac{\text{Power}}{(W_n / \dot{m})} = \frac{20 \times 10^6 \text{ watt}}{232.16 \times 10^3 \frac{J}{kg}}$$

$$\dot{m} = 86.15 \frac{kg}{s}$$

# ٤ ـ ٢
# تحويل الطاقة
# الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية

## ٤ ـ ٢ ـ ١ محرك الاحتراق الداخلي :

يتم تحويل الطاقة الكيميائية المختزنة في الوقود إلى طاقة حرارية بواسطة الاحتراق ( احتراق داخل غرفة مغلقة كاسطوانة السيارة ) حيث تتحول هذه الطاقة الحرارية مباشرة إلى طاقة ميكانيكية في هذه المحركات . تقسم محركات الاحتراق الداخلي من حيث كيفية الإشعال للوقود إلى :

١ ـ محركات الإشعال بواسطة الشمعات ( Spark ignition ) ، وتشمل محركات البنزين عموماً .

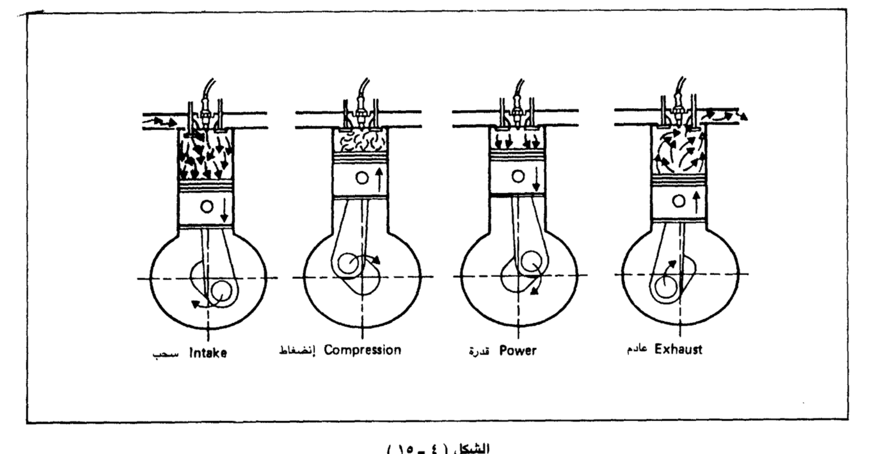
٢ ـ محركات الإشعال بواسطة الانضغاط ( Compression ignition ) ، وتشمل محركات الديزل .

ومعظم محركات الاحتراق الداخلي محركات ترددية ذات مكبس واسطوانة ، ومن ناحية عدد الأشواط وترتيب عملية الإشعال فإن محركات الاحتراق الداخلي تقسم إلى محركات رباعية الأشواط ومحركات ثنائية الأشواط .

كما هو مبين في الشكل ( ٤ ـ ١٥ ) فإن المحركات رباعية الأشواط يلزمها أربعة أشواط للمكبس لإكمال دورة الاحتراق ( إجراءات الدورة الأربعة ) وهذه الإجراءات هي :

١ ـ شوط السحب : يكون صمام السحب مفتوحاً وصمام الطرد مغلقاً .

٢ ـ شوط الانضغاط : تكون صمامات السحب والطرد مغلقة .




الشكل ( ٤ ـ ١٥ )

الأشواط الأربعة لمحرك الاحتراق الداخلي رباعي الاشواط

٣ ــ شوط القدرة : تكون صمامات السحب والطرد مغلقة أيضاً ويشتعل فيه مزيــج الهواء والوقود .

٤ ــ شوط الطرد : يكون صمام السحب مغلقاً وصمام الطرد مفتوحاً .

في المحرك رباعي الأشواط ــ كما نلاحظ ــ فإن عمود المرفق يدور دورتين كاملتين ( لفّتين ) لكل دورة احتـراق ( أربعة أشــواط ) . الدورة الثيـرموديـناميكية النظـرية لمحـرك الاحتراق الـداخلي بالإشعـال بواسطـة الشمعات هي دورة أوتـو المبينة في الشكل ( ٤ ـ ١٦ ) على مخططي ( P-V ) و ( T-S ) .

تختلف الدورة الحقيقية لمحرك الاحتراق الداخلي عن الدورة النظرية باختفاء القـرن كمـا هـو مبين في الشكـل ( ٤ ـ ١٧ ) . ويعـود ذلـك إلى حـركـة المكبس المستمـرة داخل الاسطـوانة ويكـون الشغل الحقيقي المنجـز خلال دورة احتـراق كاملة مساوياً للمساحة المحصورة داخل خـريطة المبين ( Indicator diagram ) المــوضحــة على مخطط ( P-V ) في الشكــل ( ٤ ـ ١٧ ) ، وتكــون المســاحــة المحصورة داخل خريطة المبين أقل من المساحة المحصورة داخل الدورة المثالية على مخطط ( P-V ) ــ الشكـل (٤ ـ ١٦/أ) ــ بسبب فواقـد الاحتكاك والفواقـد الحرارية وغيرها .

تعطى الكفاءة الحرارية لدورة أوتو المثالية بالمعادلة :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{q_r}{q_a} = 1 - \frac{C_v ( T_4 - T_1 )}{C_v ( T_3 - T_2 )} \qquad (٤ ـ ٣١)$$

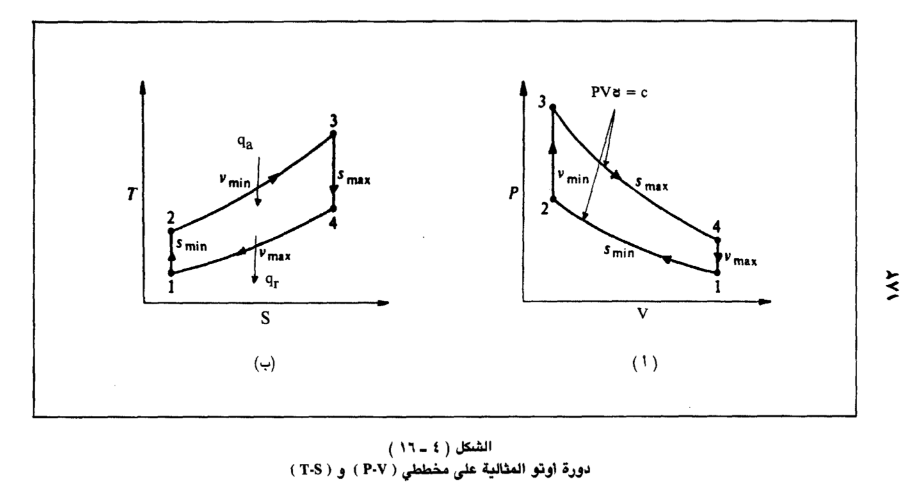
$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - ( r_v )^{1 - \gamma} \qquad (٤ ـ ٣٢)$$

حـيـث :

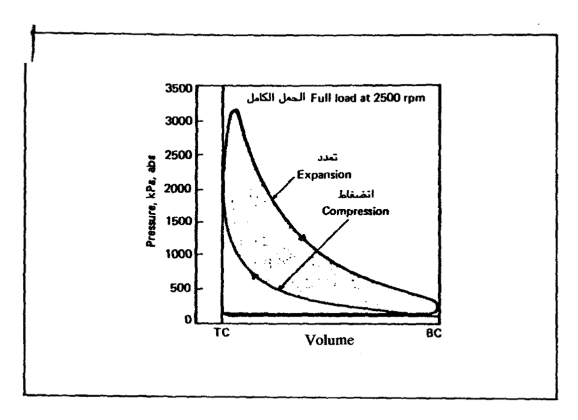
$C_v$ : الحرارة النوعية للهواء عند ثبات الحجم .

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ : الأس الايزونتروبـي للهواء .

$r_v = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$ : نسبــة الحجــوم أو نسبــة الانضــغــاط ( Compression ratio ) .




الشكل ( ٤ ـ ١٦ )
دورة أوتو المثالية على مخططي ( P-V ) و ( T-S )




**الشكل ( ٤ ـ ١٧ )**
**خريطة المبين لأحد محركات الاحتراق الداخلي**
**رباعي الأشواط عند الحمل الكامل**

ويطلق على حجم الاسطوانة عندما يكون المكبس في النقطة الميتة العليا ( T D C ) اسم حجم الخلوص ( Clearence Volume ) فتكون نسبة الانضغاط عبارة عن الحجم الكلي للاسطوانة مقسوماً على حجم الخلوص .

وبفحص المعادلة ( ٤ ـ ٣٢ ) نجد أن الكفاءة الحرارية لدورة أوتو يمكن زيادتها بزيادة نسبة الانضغاط أو بزيادة قيمة الأس الايزونتروبي ( ४ ) للوسيط العامل أو كلاهما.ولكن بما أن المقصود هو محرك الاحتراق الداخلي فإن الوسيط العامل يجب أن يكون مزيجاً من الهواء والوقود،لذا فإن قيمة الأس الايزونتروبي ( ४ ) تبقى ثابتة تقريباً . أما نسبة الانضغاط فإنه ليس بالإمكان زيادتها من دون حدود وذلك لتجنب حدوث ظاهرة الصفع ( Detomation ) والتي تؤدي إلى تقصير عمر المحرك .

يوضح الشكل ( ٤ ـ ١٨ ) طريقة عمل محرك الاحتراق الداخلي ثنائي الأشواط .

عندما يتحرك المكبس للأسفل في شوط القدرة يكشف فتحة الخروج ( Exhaust port ) لتخرج الغازات المحترقة ( المضغوطة ) وفي نفس الوقت يضغط مزيج الهواء والوقود داخل غطاء المرفق، وباستمرار نزوله للأسفل يكشف فتحة دخول المزيج بين غطاء المرفق والاسطوانة ( Transfer port ) مما يؤدي إلى دخول شحنة الهواء والوقود المضغوطة للاسطوانة .

وفي شوط الانضغاط أثناء حركة المكبس للأعلى فإنه يغلق فتحة الدخول ثم فتحة الخروج ويضغط شحنة الهواء والوقود في الاسطوانة، ثم تقوم شمعة الإشعال بإعطاء الشرارة اللازمة لبدء عملية الاحتراق قبل وصول المكبس للنقطة الميتة العليا ( T D C ) بقليل مما يؤدي إلى نزول المكبس للأسفل في شوط القدرة وتتكرر العمليات السابقة .

في هذا المحرك يضاف الزيت اللازم لتزييت عمود المرفق وكراسي التحميل إلى الوقود. وكما نلاحظ فإن الاشتعال لكل اسطوانة يحصل مرة واحدة لكل دورة لعمود المرفق .

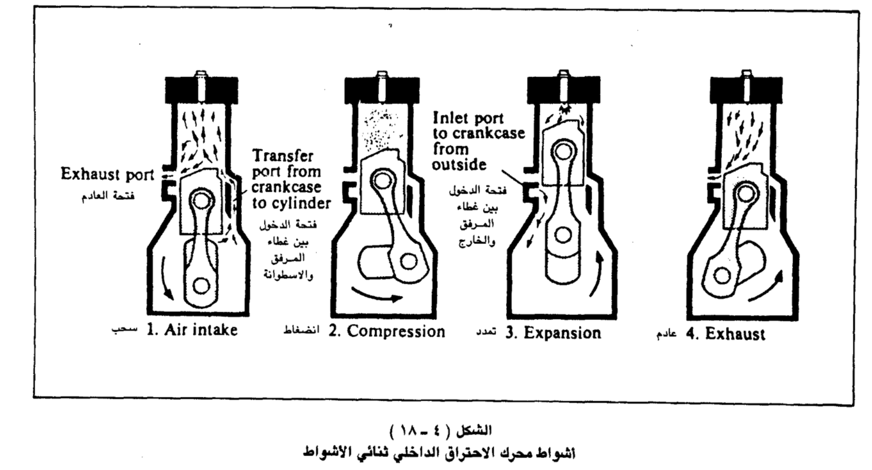
لمحركات الاحتراق الداخلي رباعية الأشواط بعض الميزات على ثنائية الأشواط :

١ ـ اقتصادية أكثر في استهلاك الوقود .
٢ ـ التزييت فيها أفضل .
٣ ـ التبريد فيها أسهل .

أما ميزات المحرك ثنائي الأشواط فهي :

١ ـ عدد الأجزاء المتحركة أقل.
٢ ـ وزن أخف .
٣ ـ تشغيل أنعم ( Smoother operation ) .

هناك محركات ثنائية الأشواط ذات صمامات وأنظمة تزييت مستقلة .




الشكل ( ٤ ـ ١٨ )
اشواط محرك الاحتراق الداخلي ثنائي الأشواط

الشكل ( ٤ ـ ١٩ ) يبين أوضاعاً متعددة لاسطوانات محركات الاحتراق الداخلي .

في حالة المحركات ذات الأربعة والستة اسطوانات فإنه من المألوف استعمالها في المحركات المستقيمة ( محركات السيارات ) .

ويستعمل الترتيب على شكل حرف V في حالة المحركات ذات الثماني اسطوانات التي تبرد بواسطة الهواء، ويستعمل وضع المكابس المتعاكسة عادة في محركات الديزل الكبيرة . أما الترتيب على شكل دلتا ( ∇ ) فإنه يستعمل في الصناعات البترولية .

وقد شاع استعمال الترتيب القطري أو المحرك القطري الذي يمتاز بارتفاع نسبة القدرة / الوزن في محركات الطائرات قبل اختراع المحركات النفاثة .

أما أشهر محركات الاحتراق الداخلي الدوارة فهو محرك ڤانكل ( Wankel engine ) الذي يستخدم قرصاً مثلثي الشكل كعضو دوار ومن ثم تنقل هذه الحركة إلى العمود المقاد بواسطة ترس داخلي .

يعطي هذا المحرك سرعات عالية تتراوح ما بين ٣٠٠٠ ـــ ٨٠٠٠ دورة / دقيقة وهو أخف وزناً وله عدد أقل من الأجزاء المتحركة وأسهل في تصنيعه مقارنة بمحرك الاحتراق الداخلي الترددي .

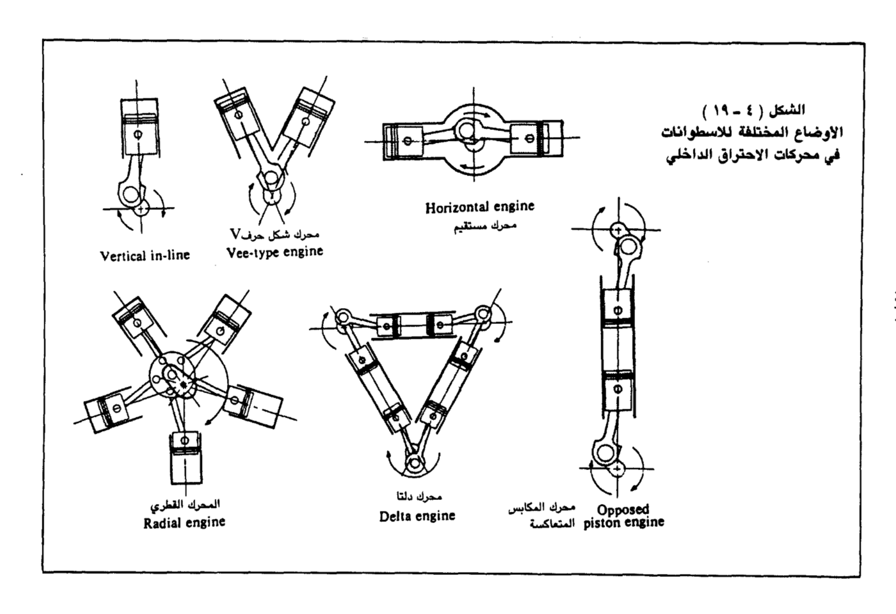
وأهم مشاكل هذا المحرك هي مشكلة الحوافظ ( Sealing problems ) ، والتي تؤدي إلى عدم الاقتصاد في استهلاك الوقود مما يقلل الاهتمام به .

ويعمل هذا المحرك على نفس مبدأ عمل المحرك رباعي الأشواط، وأشواطه هي السحب والانضغاط والاشتعال والقدرة والطرد، كما هو مبين في الشكل ( ٤ ـ ٢٠ ) .

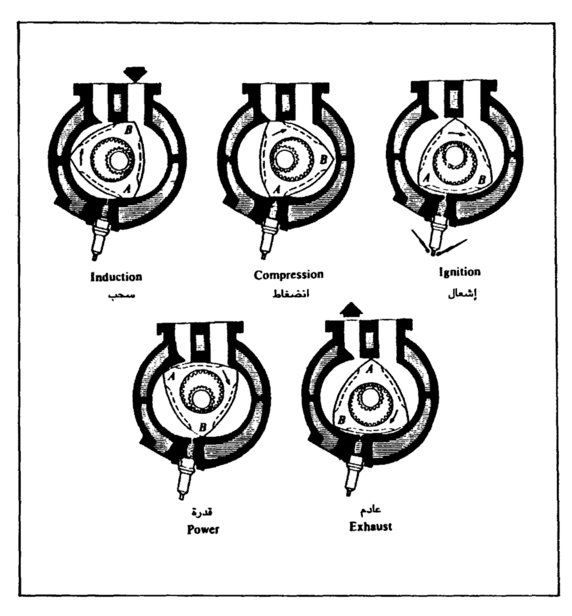
هناك انواع أخرى مختلفة من محركات الاحتراق الداخلي ولكنه لم يظهر من هذه الأنواع ما هو أفضل من محرك الاحتراق الداخلي الترددي حتى الآن .

**أداء محرك الاحتراق الداخلي :**

هناك عدة معاملات أداء من الشائع استعمالها لدراسة أداء محركات الاحتراق الداخلي، وأحد هذه المعاملات الرئيسة هو القدرة الحصانية الفرملية ( B H P ) وتعرف بأنها القدرة المتولدة على العمود المقاد للآلة، وتقاس هذه




الشكل ( ٤ - ١٩ )
الأوضاع المختلفة للاسطوانات في محركات الاحتراق الداخلي




**الشكل ( ٤ ـ ٢٠ )**
**اشواط محرك فانكل الدوار**

القدرة بواسطة جهاز مقياس العزوم ( Dynamometer ) وذلك بتطبيق قوة مفرملة خلال ذراع عزم على العمود المقاد حتى يتم إيقافه فتكون القدرة الفرملية الـلازمة بالحصان :

$$B\,H\,P = (F.\,R)\frac{w}{735} = \frac{F.\,R}{735}\left(\frac{2\pi N}{60}\right) = \frac{2\,\pi\,N\,F\,R}{44100} \quad (٤ ـ ٣٣)$$

حـيـث :

N : سرعة الآلة الدورانية ( R P M )

F : القوة الفرملية ( N )

R : ذراع العزم ( m )

أما المعامل الثاني فهـو القدرة الحصـانية البيـانية ( I H P ) وهي القـدرة المعطاة للمكبس من الغازات أو السوائل العاملة في الآلة .

والفـرق بين ( B H P ) و ( I H P ) هو القـدرة الحصانيكيـة الاحتكاكيـة ( F H P )

$$IHP = BHP + FHP \qquad (٤ - ٣٤)$$

والكفاءة الميكانيكية ( $\eta_m$ ) لمحرك الاحتراق الداخلي

$$\eta_m = \frac{BHP}{IHP} \qquad (٤ - ٣٥)$$

ومن المتغيـرات الهامـة في آلات الاحتـراق الـداخلي هـو الضغط الفـرملي المتوسط الفعال ( B M E P ) والضغط البياني المتوسط الفعال ( I M E P )

ويعطى الضغط الفرملي المتوسط الفعال بالمعادلة :

$$BHP = \frac{(BMEP)(VS)N_P}{44100} \qquad (٤ - ٣٦)$$

والضغط البياني المتوسط الفعال :

$$IHP = \frac{(IMEP)(VS)N_P}{44100} \qquad (٤ - ٣٧)$$

حـيـث :

$VS = \frac{\pi D^2 L}{4} (m^3)$ : إزاحة الكباس ( الحجم المزاح )

D : قطر الكباس ( m )

L : طول الشوط ( m )

$Np = \frac{C\,N}{a}$ : عدد أشواط القدرة لكل دقيقة

C : عدد الاسطوانات

N : سرعة الآلة ( R P M )

a : تساوي (١) للآلة ثنائية الأشواط وتساوي (٢) للآلة رباعية الأشواط .

وتقاس اقتصادية الآلة بمعدل استهلاك الوقود النوعي الفرملي ( B sfc )

ويعطى بالمعادلة :

$$B\ sfc = \frac{\text{Fuel rate } (kg\ /\ hr)}{B\,H\,P} \qquad (٤ - ٣٨)$$

أما الكفاءة الحرارية ( الكلية ) للمحرك فتعطى بالمعادلة :

$$\eta_{th} = \frac{4898}{(B\ sfc)\,(L\,H\,V)} \qquad (٤ - ٣٩)$$

حيث :

L H V : القيمة الحرارية ( المحتوى الحراري ) الدنيا للوقود ( KJ / kg )

وتعرف الكفاءة الحجمية لمحرك الاحتراق الداخلي كالآتي :

$$\eta_v = \frac{\text{حجم الهواء الداخل للاسطوانة عند الظروف الجوية}}{\text{إزاحة المكبس}} \qquad (٤ - ٤٠)$$

وتكون قيم الكفاءة الحجمية مرتفعة الاحتراق الداخلي وقد تزيد قيمة الكفاءة الحجمية عن ١٠٠ ٪ في حالة استخدام الشحّانات ( Super chargers ) .

**مـثـال :**

في محـرك ثنـائي الأشـواط ( ذات اسطـوانتين ) كـانت سـرعـة المحـرك ( 600 R P M ) وقطـر المكبس ( 110 m m ) وطول الشـوط ( 140 m m ) إذا كانت ( I H P = 20 ) والكفاءة الميكانيكية تساوي ( 0.82 ) . احسب ( I H P ) و ( B M E P ) .

$$\eta_m = \frac{BHP}{IHP} \Rightarrow 0.82 = \frac{BHP}{20} \Rightarrow BHP = 16.4$$

$$BHP = \frac{(BMEP)(V_S)(N_P)}{44100}$$

$$V_S = \frac{\pi D^2 L}{4} = \frac{\pi (\frac{110}{1000})^2 * 0.14}{4} = 0.00133 \ m^2$$

$$N_p = \frac{CN}{a} = \frac{2 * 600}{1} = 1200 \frac{\text{Power Stroke}}{\text{minute}}$$

$$16.4 = \frac{(BMEP)(0.00133)(1200)}{44100}$$

$$\begin{aligned} BMEP &= 453158 \text{ Pascal} \\ &= 453 \text{ Kpa} \\ &= 4.53 \text{ bar} \end{aligned}$$

**مـثـال :**

محـرك احتراق داخلي ذو ثمـاني اسطـوانـات وربـاعي الأشـواط سـرعتـه ( 2400 R P M ) وقطـر كباسـه ( 120 m m ) وطول الشـوط ( 125 m m )، إذا كان ( B M E P = 820 KPa ) .

احسب ( B H P ) ، وإذا كـانت الكفاءة الميكـانيكيـة هي ( 0.85 ) احسب ( I H P )

$$B\,H\,P = \frac{(B\,M\,E\,P)(V_S)(N_p)}{44100}$$

$$V_S = \frac{\eta\, D^2\, L}{4} = \frac{\eta\,(0.12)^2\,(0.125)}{4} = 0.00144\ m^3$$

$$N_p = \frac{C\,N}{a} = \frac{8 \times 2400}{2} = 9600\,\frac{\text{Power stroke}}{\text{minute}}$$

$$B\,H\,P = \frac{820 * 10^3 * 0.0014 * 9600}{44100} = 252.4$$

$$I\,H\,P\,\frac{B\,H\,P}{\eta_m} = \frac{252.4}{0.85} = 296.94$$

**مـثـال :**

في دورة أوتـو مثاليـة كانت درجـة الحـرارة في بـدايـة إجـراء الانضغـاط ( $T_1 = 50°C$ ) والضغط ( $P_1 = 0.97$ bar ) ونسبة الحجوم هي ( 5:1 ) .

إذا كانت الحرارة المكتسبة في الدورة تساوي ( 930 KJ / kg ) احسب :

١ ـــ درجة الحرارة العظمى .

٢ ـــ الكفاءة الحرارية .

٣ ـــ الشغل المنجز لكل كغم من الغاز العامل ( الشغل النوعي ) .

افترض أن ( $C_V = 0.717\,\frac{KJ}{kg.K}$ ) وأن ( $\gamma = 1.4$ ) للغاز العامل .

١ ـــ $T_1 = T_2\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma - 1} = (50 + 273)\left(\frac{5}{1}\right)^{1.4 - 1} = 615\ K$

$$q_a = C_v ( T_3 - T_2 ) = 0.717 ( T_3 - 615 )$$

$$920 = 0.717 ( T_3 - 615 )$$

$$T_3 = 1910 \text{ K} = 1637°\text{C}$$

$$\eta_{th} = 1 - ( r_v )^{1 - \gamma} = 1 - (5)^{1 - 1.4} = 0.475 \qquad \text{ـ ٢}$$

$$W_n = q_a \times \eta_{th} = 930 \times 0.475 = 442 \frac{KJ}{kg} \qquad \text{ـ ٣}$$

**ــ محركات الاشتعال بواسطة الانضغاط ( C I ) ــ محركات الديزل :**

تعرف محركات الاحتراق الداخلي ذات الانضغاط ــ الاحتراق ( C I ) بمحركات الديزل، وتصمم هذه المحركات عادة بنسب انضغاط تتراوح ما بين ١:١٤ ــ ١:٢٢ ففي شوط الانضغاط يرتفع الضغط للهواء إلى مقدار يصل إلى ( 3500 Kpa ) أو أكثر وتصل درجة الحرارة إلى ( 540°C ) وقبل وصول المكبس إلى النقطة الميتة العليا يحقن الوقود في الاسطوانة ( غرفة الاحتراق ) ويحدث الاحتراق بسرعة نتيجة لوصول المزيج إلى ضغط ودرجة حرارة تسمحان بحدوث الاشتعال الذاتي للوقود ( الديزل ). وتتراوح ضغوط حقن الوقود ما بين ٧ ــ ٧٠ ميغا باسكال. وتصنف محركات ( C I ) حسب سرعتها إلى محركات ذات سرعات منخفضة ( أقل من 500 R P M ) وذات سرعات متوسطة ( 500-1000 R P M ) وذات سرعات عالية ( أكثر من 1000 R P M ) .

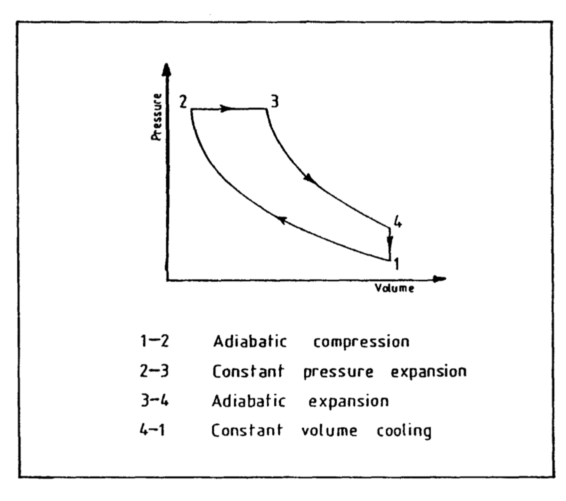
الدورة النظرية لمحركات الاشتعال بواسطة الانضغاط ، هي دورة ديزل المبينة في الشكل ( ٤ ـ ٢١ ) على مخطط ( P-V ) ، ويبين الشكل (٤ ـ ٢٢) الدورة الحقيقية لمحركات الاشتعال بواسطة الانضغاط على مخطط ( P-V ) .

وتعطى الكفاءة الحرارية لدورة ديزل المثالية ( النظرية ) بالمعادلة :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{C_v ( T_4 - T_1 )}{C_p ( T_3 - T_2 )} \qquad ( \text{٤ ـ ٤١} )$$

ومنها فإن :

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \qquad ( \text{٤ ـ ٤٢} )$$



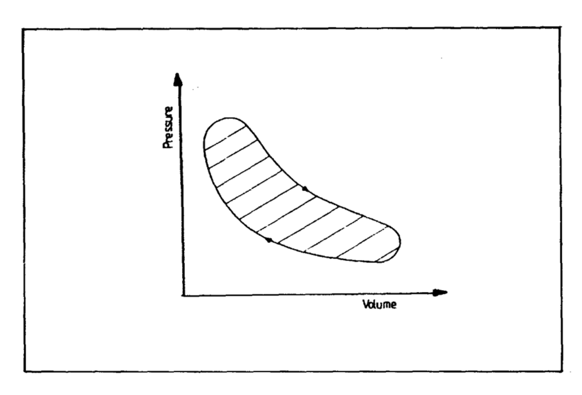

**الشكل ( ٤ ـ ٢١ )**
**دورة ديزل المثالية على مخطط ( P-V )**

**مـثـال :**

في دورة ديـزل مثاليـة كانت درجـة الحـرارة في بـدايـة عمليـة الانضغـاط ( 60°C ) والضغط ( $98.5\ KN / m^2$ ) وكان أقصى ضغط في الدورة ( 45 bar ) والحرارة المكتسبة ( $q_a = 580\ KJ / kg$ ) . احسب :

١ ـ نسبة الانضغاط .
٢ ـ درجة الحرارة في نهاية عملية الانضغاط .
٣ ـ درجة الحرارة في نهاية عملية الاحتراق .

افترض أن ( $C_p = 1.003\ KJ / kg.K$ ) وأن ( $\gamma = 1.4$ ) .




الشكل ( ٤ ـ ٢٢ )
خريطة المبين، الاشتعال بواسطة الانضغاط

$$1 — P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = \left(\frac{45}{0.985}\right)^{\frac{1}{1.4}} = 15.53$$

$$2 — \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma - 1}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma - 1} = (60 + 273)(15.33)^{1.4 - 1}$$

$$= 992.3 \text{ K}$$

$$3 — q_a = C_p (T_3 - T_2)$$

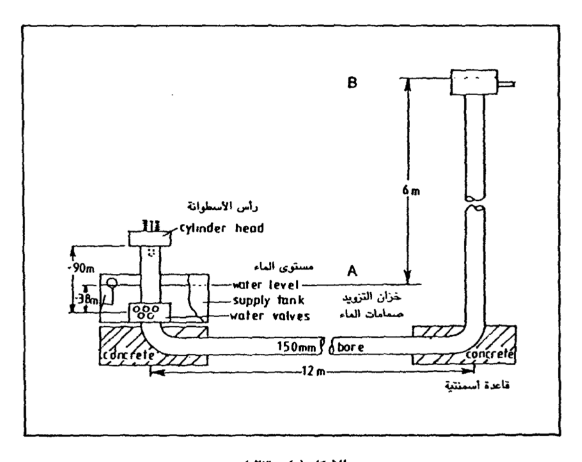
$$580 = 1.003 (T_3 - 992.3)$$

$$T_3 = 1570.6 \text{ K}$$

## ٤ ـ ٢ ـ ٢ مضخة همفري : ( Humphrey Pump )

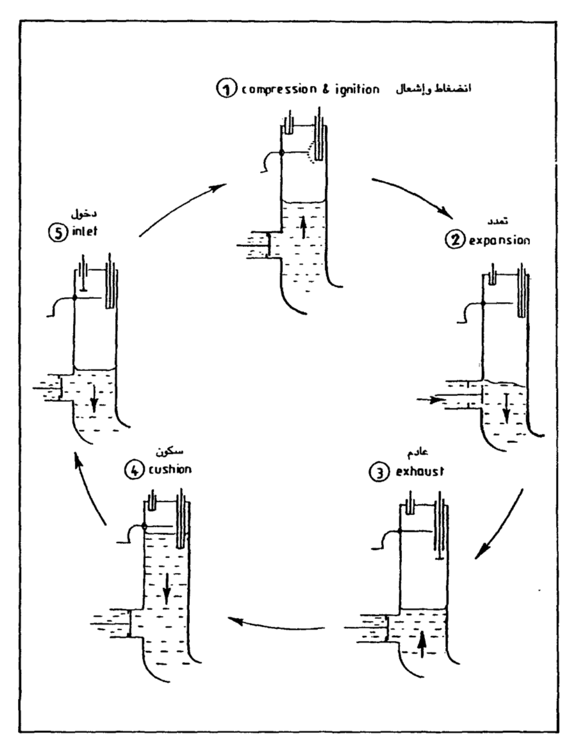
في مضخة همفري ، تعمل طاقة الغازات المحترقة ( الغازات المتمددة أثناء الاحتراق) على ضخ المياه مباشرة من دون الحاجة إلى استخدام مكبس واسطوانة لتحويل الطاقة الحرارية والضغط الناتجين عند احتراق الغاز ( الوقود ) إلى طاقة ميكانيكية دورانية كما هو الحال في محركات الاحتراق الداخلي .

وكما هو مبين في الشكل ( ٤ ـ ٢٣ ) فإن هذه المضخة تتكون أساساً من أنبوب على شكل حرف ( U ) يتأرجح فيه عمود من الماء طلوعاً ونزولاً عند حرق شحنة من الغاز والهواء بشكل دوري . ويقوم عمود الماء بخزن الطاقة مؤقتاً ـ كالحدافة ـ أثناء حركته المتأرجحة .




الشكل ( ٤ ـ ٢٣ )
رسم تخطيطي مبسط لمضخة همفري يبين المكونات الأساسية
للمضخة التي تقوم برفع الماء من المستوى (A) إلى المستوى (B)

الشكــل ( ٤ ـ ٢٤ ) يبين مقطعــاً مكبــراً لمنطقــة سحب المــاء والاسطــوانـــة




الشكل ( ٤ ـ ٢٤ )
الأشواط الأربعة لمضخة همفري

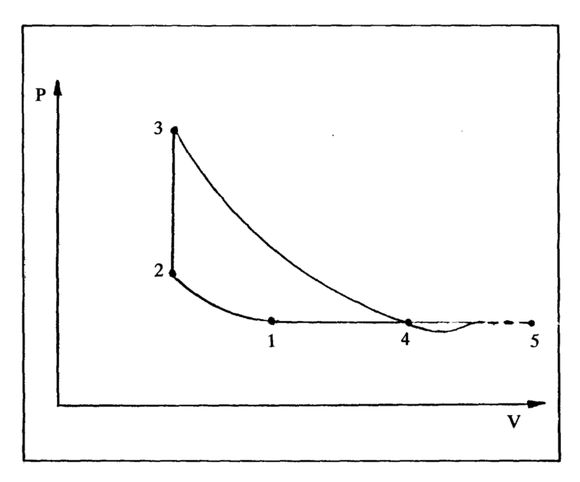
وصمامات المضخة المختلفة بالإضافة إلى أشواط الأداء الأربعة للمضخة وهي :

( $2 \rightarrow 1$ )انضغاط المزيـج من الغاز والهواء بفعل رجوع عمود الماء للأعلى في الاسطوانة نتيجة الاستمرارية في الحركة .

( $3 \rightarrow 2$ )اشتعال المزيـج وارتفاع الضغط فوق عمود الماء .

( $5 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ ) تمدد الغاز المحترق وتحرك عمود الماء هبوطاً في الاسطوانة مما يؤدي إلى انخفاض الضغط داخل الاسطـوانة تحت الضغط الجـوي في نهايـة الشوط وهـذا بـدوره يؤدي إلى فتـح صمـام دخـول المـاء وانـدفـاع المـاء من الخـزان إلى الاسطوانة .

( $1 \rightarrow 5$ ) رجـوع عمود المـاء بفعل كميـة تحركـه التي يمتلكها مما يؤدي إلى




الشكل ( ٤ ـ ٢٥ )
دورة اتكنسون

خروج الغازات العادمة من صمام الخروج ، ويستمر عمود الماء بالارتفاع حتى يصل إلى مستوى صمام العادم فيغلقه .

الدورة النظرية ( المثالية ) لمضخة همفري ، هي دورة إتكنسون المبينة في الشكل ( ٤ ـ ٢٥ ) ، والكفاءة النظرية لدورة إتكنسون تصل إلى ٤٥ ٪ ولكن الكفاءة الفعلية ( العملية ) لمضخة همفري تتراوح ما بين ١٠ ـــ ٢٠ ٪ وذلك بسبب الفواقد الحرارية المختلفة من الأنابيب والاسطوانة ( المضخة ) إلى المحيط الخارجي بالإضافة إلى أن جزءاً كثيراً من الطاقة الحرارية تمتصه قطرات الماء الموجودة على جدران الاسطوانة الداخلية عند احتراق مزيج الهواء والوقود الغازي .

# ٤ ـ ٣
# التوربينـات المائيـة

تقوم هذه التوربينات بتحويل طاقة الوضـع في المياه إلى شغل مفيد ( طـاقة ميكـانيكيـة ) ، ويمكن تصنيف التـوربينـات المـائيـة إلى تـوربينـات رد فعـل ( Reaction ) وتـوربينات دفعيـة ( Impulse ) والتوربينـات مختلطـة الجـريـان ( Mixed flow ) ومن حيث اتجـاه الجـريـان في التـوربين يمكن تصنيفهـا إلى توربينات ذات جريان قطري ومحوري ومختلط .

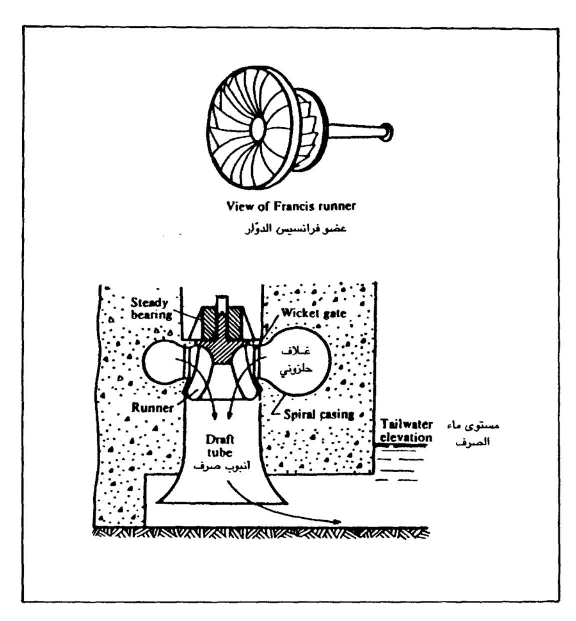
من أشهـر التـوربينـات الـرد فعليـة تـوربينـات فـرانسيس ــ الشكـل ( ٤ ـ ٢٦ ) ــ وكابلان ــ الشكل ( ٤ ـ ٢٧ ) ــ .

ومن أشهـر التـوربينـات الـدفعيـة تـوربين ( دولاب ) بلتـون ــ الشكـل ( ٤ ـ ٢٨ ) ــ .

١ ــ تستعمل التوربينات الدفعية مثل بلتون في حالة الارتفاعـات العاليـة ، التي تزيد عن ٥٠ متراً ويعتبر هذا التوربين ذو كفاءة تحويلية عالية .

٢ ــ وتستعمل توربينات رد الفعل مثـل توربينـات فرانسيس ذات الجـريان القطري والمختلط في حالة الارتفاعـات المتوسطـة (٥ ــ ٤٦٠ متراً). وتعتبر توربينات فرانسيس ذات كفاءة تحويلية ــ من طاقة مائيـة إلى ميكانيكية ــ ممتازة عند الأحمال العاديـة ولكنها ذات كفـاءة منخفضة في حالة الأحمال الجزئية ( Part Load ) .

أما توربين كابلان ذو الجريان المحوري فإنه يستعمل في حـالة الارتفـاعات المنخفضـة ( ٣ ـ ٣٠ متراً) وهـو ذو كفاءة تحـويليـة عـاليـة في حـالـة الاحمـال

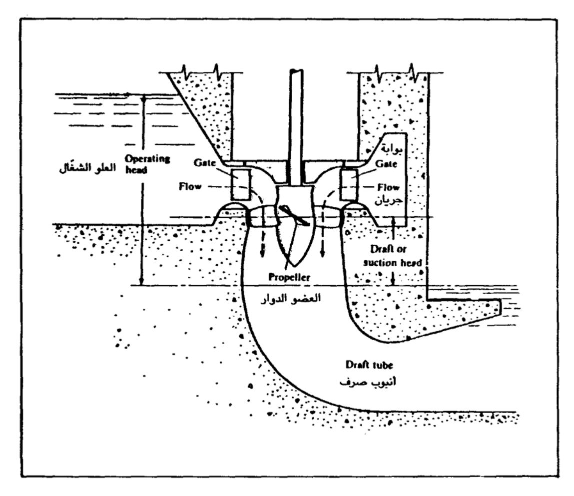



الشكل ( ٤ ـ ٢٦ )
توربين فرانسيس

التصميمية ( Design Load ) وذو كفاءة منخفضة في حال الاحمال الجزئية أو معدلات السريان المنخفضة .

تعطى القدرة المائية ( Water power ) للتوربينات المائية بالمعادلة :

$$W P = \frac{\rho Q H}{1000} \qquad (٤ ـ ٤٣)$$




الشكل ( ٤ ـ ٢٧ )
توربين كابلان

حيث :

$\rho$ : كثافة الماء ( $1000 \ kg / m^3$ )

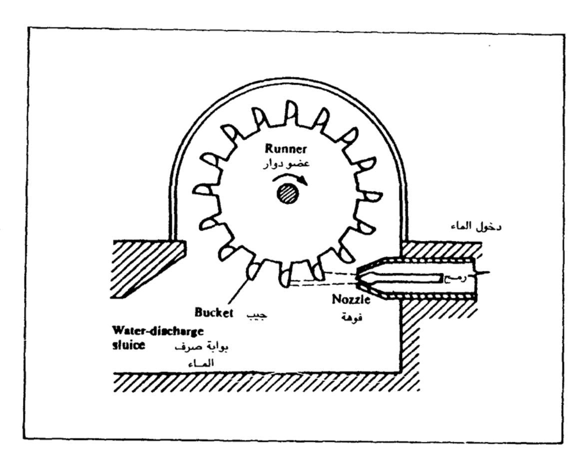
g : تسارع الجاذبية الأرضية ( $9.81 \ m / s^2$ )

Q : الصرف الحجمي ( $m^3 / s$ )

H : ارتفاع الماء الكلي على التوربين ( m )

الكفاءة الكلية للتوربين :

$$\eta_t = \frac{BP}{WP} \qquad (٤ ـ ٤٤)$$




**الشكل ( ٤ ـ ٢ )**
**توربين ( دولاب ) بلتون**

حـيـث :

B P : القدرة الفرملية ( K W )

وتعطى القدرة الفرملية بالمعادلة :

$$B\,P = \frac{F\,R\,\pi\,N}{30000} \qquad (٤ _ ٤٥)$$

N : سرعة التوربين الدورانية ( R P M )

F : القوة الفرملية ( N )

R : ذراع الفرملة ( m )

**مـثـال :**

في تـوربين بلتون كـان ارتفـاع المـاء المتوافـر هـو ( 150 m ) والصـرف ( $0.6\ m^3 / s$ ) ولإيجاد القدرة الفرملية لزمت قوة مقـدارها ( 30 K N ) لإيقـاف التـوربين خـلال ذراع عـزم طـولهـا (0.5 m) عنـدمـا كـانت سـرعـة التـوربين ( 450 R P M ). احسب الكفاءة التحويلية الكلية للتوربين .

$$W P = \frac{\rho g Q H}{1000} = \frac{1000 * 9.81 * 0.6 * 150}{1000} = 882.9\ K W$$

$$B P = \frac{F R \pi N}{30000} = \frac{30 * 10^3 * 0.5 * \pi * 450}{30000} = 706.8\ K W$$

$$\eta_t = \frac{B P}{W P} = 0.8$$

**مـثـال :**

تـوربين رد فعلي يدور بسـرعـة ( 200 R P M ) ويلـزمـه صـرف مقـداره ( $0.5\ m^3 / s$ ) تحت علـو مائي مقـداره ( 40 m ) وينتـج قـدرة فعليـه مقـدارهـا ( 1170 K W ) . احسب الكفاءة الكلية للتوربين .

$$W P = \frac{P g Q H}{1000} = \frac{1000 * 9.81 * 5 * 40}{1000} = 1962\ K W$$

$$\eta_t = \frac{B P}{W P} = \frac{1170}{1962} = 0.596$$

● ● ●

# الفصل الخامس

# إنتاج الطاقة الكهربائية

# ٥ ـ ١
# مقدمة الفصل الخامس

المولد الكهربائي عبارة عن جهاز يحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية. وتستعمل المولدات الكهربائية في الصناعة لإنتاج التيار المستمر ( D C ) أو التيار المتردد ( A C ). ففي السيارة مثلاً فإن وظيفة المولد ( الدينمو ) توليد الطاقة الكهربائية التي تُخزن في المركم لحين الاستعمال حيث يعمل المركم في هذه الحالة كمكثف للطاقة الكهربائية .

وفي التطبيقات العملية الكبرى فإن المولدات الكهربائية تُقاد بواسطة توربينات غازية أو بخارية، حيث تصل كفاءة التحويل في بعض هذه المولدات الكبيرة إلى أكثر من ٩٠ ٪ في حين أن هذه الكفاءة قد تنخفض إلى ٥٠ ٪ في المولدات الصغيرة .

## ٥ ـ ٢

## مبدأ عمل المولد الكهربائي ( المنوبة )

يعتمد مبدأ عمل مولد التيار الكهربائي المتردد A C generator or ) alternator ) على قانون فاراداي ( Faraday's law ) ، الذي ينص على أن فرقاً في الجهد يتولد في موصل كهربائي يتحرك بشكل متعامد على خطوط مجال مغناطيسي . والصيغة الرياضية لهذا القانون :

$$V = n \frac{d \phi}{d t} \qquad (٥ - ١)$$

حيث :

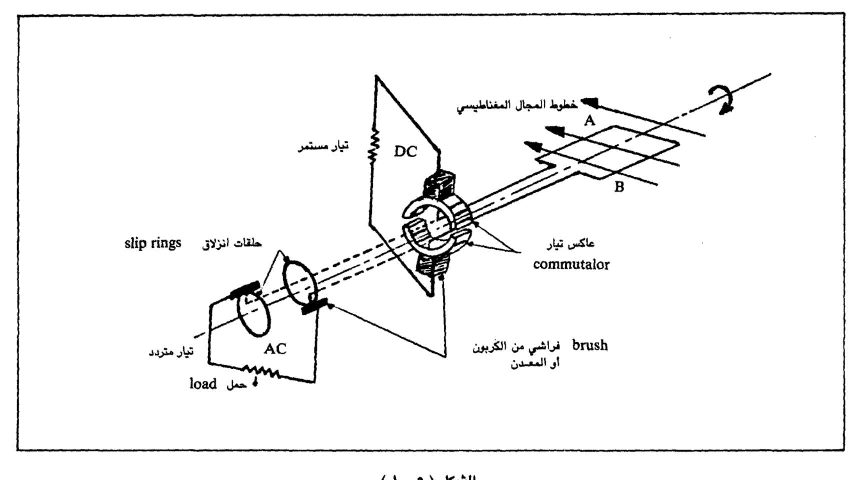
V : فرق الجهد المتولد في الملف .

n : عدد لفات الملف .

$\frac{d \phi}{d t}$ : معدل التغير الزمني للتدفق المغناطيسي ( Magnatic flux ) أو خطوط القوى المغناطيسية التي يتحرك فيها الملف .

أما قطبية الجهد المتولد فإنها تحدد بواسطة قانون لنز ( Lenz's law ) ، الذي ينص على أن فرق الجهد المتولد يكون بحيث ان التيار المتولد عن هذا الجهد يُنتج تأثيراً مغناطيسياً معاكساً للتغير في المجال المغناطيسي الذي يولد فرق الجهد في الملف ( قانون الفعل ورد الفعل ) .

كما هو مبين في الشكل (٥ ـ ١ ) فإن المولد الأساسي يتكون من ملف

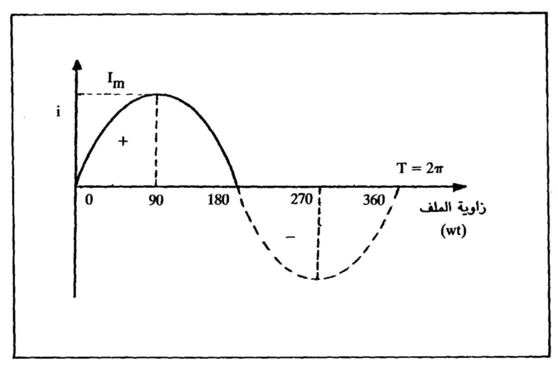



**الشكل ( ٥ ـ ١ )**
**المولد الكهربائي الأساسي**

ذي لفه واحدة لموصل كهربائي يدور في مجال مغناطيسي معامد لاتجاه الموصل ( السلكان A و B ) وللحصول على تيار متردد ( A C ) فإن طرفي الموصلين ( A ) و ( B ) يوصلان بحلقتي انزلاق ( Slip rings ) مثبتتين على عمود الملف ( Coil shaft ) ومعزولتين بعضهما عن بعض وعن العمود ، وفي هذا الوضع فإن التيار المتولد يبقى على حاله من دون تغيير، أي على شكل تيار متردد ، يؤخذ من حلقات الانزلاق إلى الحمل الخارجي بواسطة فرشاتين من المعدن أو الكربون تنزلقان على حلقتي انزلاق كما هو مبين في الجزء المنقط من الشكل ( ٥ ـ ١ ) .

تولد الدورة الكاملة للملف ( ٣٦٠° ) تياراً متردداً يتخذ شكل المنحنى الجيبي ( Sine Wave ) كما هو مبين في الشكل ( ٥ ـ ٢ ) ونصف هذه الدورة موجب والنصف الآخر سالب ( في اتجاه معاكس ) .

تعطى قيمة تيار الهيئة الموجبة ( تيار المنحنى الجيبي ) المبين في الشكل ( ٥ ـ ٢ ) بالمعادلة :




الشكل ( ٥ ـ ٢ )
تيار المنحنى الجيبي

$$i = I_m \sin wt \qquad (٥ - ٢)$$

حيث :

i : القيمة اللحظية للتيار ( أمبير ) .

$I_m$ : القيمة العظمى للتيار أو اتساع ( Amplitude ) الموجة ( أمبير ) .

wt : زاوية الملف مقاسة بالدرجات الكهربائية ( Electrical degrees ) .

t : الزمن ( ثانية ) .

ويعرف التردد ( $f$ ) للموجة بأنه عدد الدورات التي تحدث في وحدة الزمن ، ووحدة التردد هي دورة / ثانية أو الهيرتز ( $H_z$ ) حيث ان : ( $I\ H_z = 1$ cycle / s ) . ومن مضاعفات هذه الوحدة الكيلوهيرتز ( $1\ kH_z = 1000\ H_z$ ) والميغاهيرتز ( $1\ MH_z = 10^6\ H_z$ ) وتعرف الفترة ( T ( Period بأنها الزمن ـــ بالثانية ـــ الذي تستغرقه الدورة الواحدة .

$$T = \frac{1}{f} \qquad (٥ - ٣)$$

وباستخدام المعادلة ( ٥ ـ ٣ ) فإنه يمكن إعادة كتابة المعادلة ( ٥ ـ ٢ ) على النحو :

$$i = I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T}\right)t \qquad (٥ - ٤)$$

أو :

$$i = I_m \sin(2\pi f t) \qquad (٥ - ٥)$$

حيث ان :

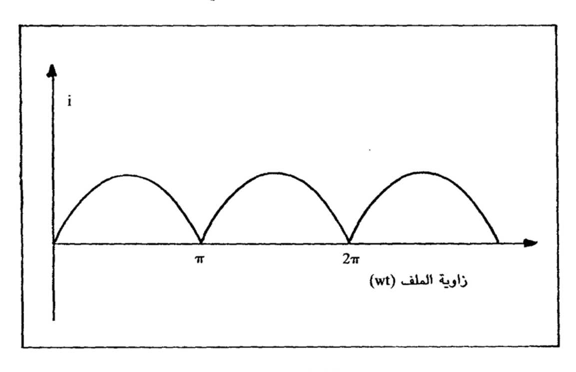
$$w = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \qquad (٥ - ٦)$$

إذا كان الغرض توليد تيار مستمر ( D C ) فإن ذلك يتم بـاستبدال حلقـات الانـزلاق بعاكس التيـار ( Commutator ) كمـا هـو مبين في الشكـل ( ٥ ـ ١ ) ـ الخط المتصل ـ .

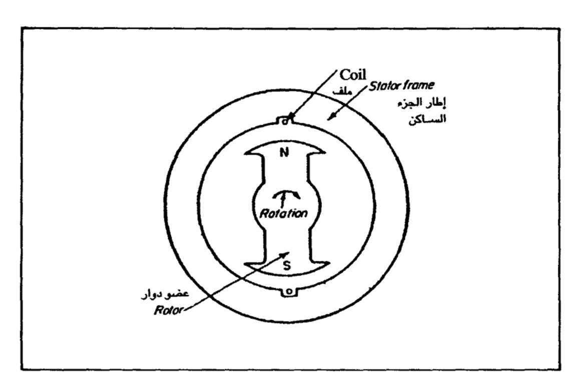
وعـاكس التيار عبـارة عن حلقتي معدن تقسم كـل منهما إلى أجـزاء مفـردة معزولة بعضها عـن بعض وعن العمود المربوطة إليه ( عمود الملف ) .

في حالة مولد التيار المستمر البسيط (ذي الملف الواحد ) فإن عاكس التيار يمكن اعتباره قطعتين فقط تنزلق على كل منهما فرشاة من الكربون وتتصـل قُطعتي الكربون بسلكين لإكمال الدائرة الكهربائية مـع الحمل الخارجي ويكون شكل التيار المتولد من هذا المولد البسيط كما هو مبين في الشكل ( ٥ ـ ٣ ) .

كما هو مبين في الشكل ( ٥ ـ ٤ ) ، يتكون مـولد التيـار المتردد أو المنـوّبة ( Alternator ) من جزئين أساسيين همـا الجزء الـدوار ويسمى بالعضـو الدوار ( Rotor ) والجزء الساكن (Stator) وفي المنوّبات الحديثة فـإن ملفّات المجـال ( Field windings ) تُربط على العضو الدوار بينما يكون المنتـج ( Armature ) ثابتاً ، ولهذا فإن الفولتية العـالية المتـولدة تكـون في المنتـج ، وتزود من المنتـج




**الشكل ( ٥ ـ ٣ )**
**التيار المتولد في حالة استخدام عاكس تيار مكون من قطعتين فقط**




**الشكل ( ٥ ـ ٤ )**
**المكونات الأساسية لمولد التيار المتردد ( المنوبة )**

للأحمال الخارجية في حين تستعمل حلقات الانزلاق والفراشي لتزويد التيار المنخفض ــ مقارنة مع التيار المتولد ــ المستمر ( D C ) إلى ملفّات العضو الدوار ( ملفّات المجال المغناطيسي الدوار ) ولهذا فإن المنوّبة ( Alternator ) بحاجة إلى مولد تيار مستمر ( D C ) للقيام بذلك ( توفير التيار المستمر ) .

وحسب الطور الناتج يمكن تصنيف المنوبات إلى :

**١ ــ أحادية الطور** : ( Single phase )

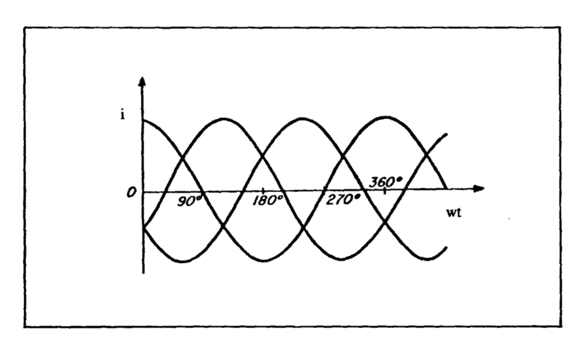
وفي هذه الحالة فإن ملفات المنتج تكون متصلة بعضها مع بعض لجمع الفولتيات المتولدة في كل ملف بشكل منفرد ويكون هناك سلكان نهائيان فقط للمولد لإعطاء الفولتية الناتجة .

**٢ ــ ثنائية الطور** : ( Two phase )

يضم المنتج مجموعتين من الملفات مرتبة بحيث ان الفولتية أو التيار المتولد في كل سلك من الأسلاك الخارجة من المولد ــ أحدها مشترك Common ــ يفصل بينهما زاوية طور ( Phase angle ) مقدارها ٩٠° .

### ٣ ـــ ثلاثية الطور : ( Three phase )

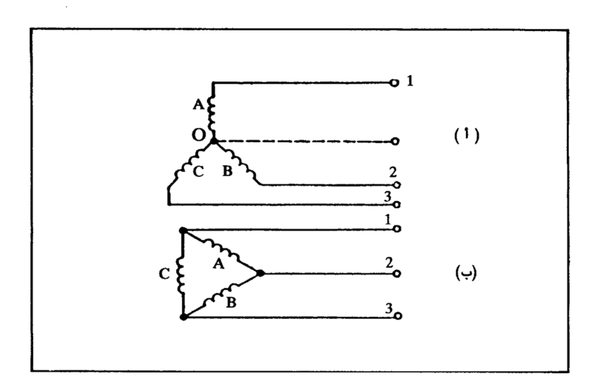
يضم المنتـج ثلاث مجموعات من الملفات مرتبة بحيث ان الفولتيات الخارجة من هذه الملفات يفصل بينها زاوية طور مقـدارها ١٢٠° كمـا هو مبين في الشكـل ( ٥ ـ ٥ ) ، وفي هذا الترتيب هناك ست أسلاك ( ثلاثة أزواج من الأسلاك ) للتيار أو الجهد المتولد ، يمكن توصيلها إما بطريقة واي ( Y connection ) أو بطـريقة دلتا ( Δ connection ) كما هو مبين في الشكل ( ٥ ـ ٦ ) .




**الشكل ( ٥ ـ ٥ )**
**التيار أو الجهد المتولد من مولد كهربائي ثلاثي الطور**

في توصيلة ( Δ ) فإن فرق الجهد بين خطين ( $V_{12}$ ) مثلاً ( يسمى الجهد الخلفـي ) يسـاوي فـرق الجـهـد فـي أي ملـف ( C ) و ( B ) و ( A ) أي أن ( $V_{12} = V_A = V_C$ ) في حين أن تيـار الخط يساوي تيـار الملف مضروبـاً في ( $\sqrt{3}$ ) أي أن ( $I_1 = I_A \sqrt{3}$ ) مثلاً .

وفي توصيلة ( Y ) فإن فرق الجهد بين خطين ( $V_{12}$ ) ـــ مثلاً ـــ يسـاوي فرق الجهد للملف مضروباً في $\sqrt{3}$ أي أن ( $V_{12} = \sqrt{3}\ V_A$ ) مثـلاً ، بينما تيـار الخط يساوي تيـار الملف وكذلـك فإن فرق الجهد للملف يساوي فرق الجهد




الشكل ( ٥ ـ ٦ )
التوصيلات ثلاثية الطور.
( أ ) توصيلة واي ( Wye )أو ستار ( Star )
(ب) توصيلة دلتا ( Delta )

بين أي خط والخط المتعادل ، أي أن ( $V_{30} = V_{20} = V_{10} = V_C = V_B =$
$V_A$ )

وفي النظام ثلاثي الطور فإن القدرة الكهربائية الناتجة :

$$P = \sqrt{3}\ V_L I_L \cos\theta = 3\ V_b I_b \cos\theta \qquad (٥ - ٧)$$

حيث :

$I_L, V_L$ : جهد وتيار الخطوط على الترتيب .

$I_C, V_C$ : جهد وتيار الفروع ( الملفات ) .

$\cos\theta$ : معامل القدرة ( Power factor ) .

أما العلاقة بين السرعة الدورانية للمولد ( N ) والتردد الناتـج ( $f$ ) فهي :

$$N = \frac{120 f}{n_p} \qquad (٨ - ٥)$$

حـيـث :

N : السرعة الدورانية للمولد ( R P M ) دورة / دقيقة .

$f$ : تردد التيار المتولد ( $H_z$ ) هيرتز .

$n_p$ : عدد الاقطاب الموجودة على العضو الدوار للمنوبة ( Alternator ) .

# ٥ ـ ٣
# الطرق المباشرة لتوليد الطاقة الكهربائية

## ٥ ـ ٣ ـ ١ التـوليد الكيميـائي :

إن المراكم ( البطاريات ) وخلايا الوقود ( Fuel cells ) هما نظامان تتحـول فيهما الطاقة الكيميائية المختزنة إلى طاقة كهربائية مباشرة دون الحاجة إلى المرور عبر التحول إلى طاقة حرارية ، ولهذا فإن عمليـة التحويـل هذه لا يحـدُّها القـانون الثاني للثيرموديناميكا الحراريـة ، أي انها لا تخضـع لقـانون أقصى كفـاءة للآلـة الحرارية اللاإرجاعية ( $\eta = 1 - T_L / T_H$ ) ، ولهذا السبب فإن هذين النظامين يلاقيان الاهتمام وتكثر البحوث عنهما .

تتشابه المـراكم وخلايـا الوقـود في عملها مـع وجـود فرق رئيس ، وهـو أن المركم يحتوي على كمية محدودة من الوقود أو الطاقة الكيميائية في حين أن خلية الوقود تعمل تحت تزويد مستمر للوقود . بعض المراكم هي أجهزة انعكـاسية ، أي أن نـواتـج التفاعـل الكيميائي يمكن إعـادتها ( فصلهـا ) إلى مكونـاتها الأصليـة بواسطة تزويد البطـارية بـالكهربـاء في عملية إعـادة الشحن ( Recharging ) ، ولكن خـلايا الـوقود لا يمكن إعـادة شحنهـا لأن نـواتـج التفـاعـل الكيميـائي يتم التخلص منها باستمرار ، وتُستخدم المراكم كأنظمة خزن للطـاقة ويمكن تقسيمهـا إلى قسمين رئيسين :

١ ــ المراكم الأولية ( Primary batteries ) .
٢ ــ المراكم الثانوية ( Secondary batteries ) .

والمراكم الأولية لا يمكن عادةً إعادة شحنهـا ولكن المراكم الثـانويـة ــ مثل المركم الرصاصي في السيارات ــ فإنه بالإمكان إعادة شحنها .

تتشابه خلية الوقود مـع المركم في التـركيب من حيث ان لكل منهمـا قطبان ( Electrodes ) بينهما سائل أيوني ( Electrolyte solution ) والذي هو عبـارة عن محلول يتحلل كهربائياً في خلايـا الوقـود . يتم تغذيـة المتفاعـلات من الوقـود ـــ الهيدروجين أو أول أكسيد الكـربون غالباً ـــ لأحد الأقطاب المسامية Porous ) ( electrode بينما يتم تغذية الأكسجين أو الهواء للقطب المسامي الآخر .

وتـقـوم الأقطاب في خلايا الوقود بثلاث مهمات :

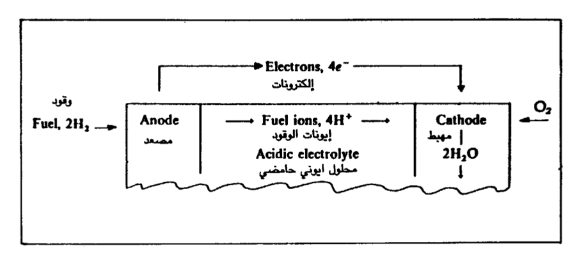
١ ـــ يجب أن يكون القطب مسامياً بحيث ان الوقود والسائل الأيوني تكـون قـادرة على اختـراقـه لتحقيق أفضـل اتصـال بينهمـا . تعـد أحجـام المسامات ( Pore size ) للأقطاب ذات أهمية بالغة في خلايا الوقود، فإذا كانت هذه الأحجام كبيرة ، فإن الوقود الغازي يكوّن فقـاعات في هذه المسامات مما يؤدي إلى هدر الوقود، وإذا كانت هـذه المسامـات صغيرة الحجم كثيراً ، فإنه لا يتم تحقيق اتصال كافٍ بين المتفاعلات والسائل الأيوني مما يؤدي إلى خفض سعة المركم .

٢ ـــ يجب أن يحتوي القطب على عوامـل مساعـدة كيميائيـة Chemical ) ( catalysts تقوم بتكسير مركبات الوقود إلى ذرات ليكون الوقود أكثر فعالية. وأكثـر أنواع العـوامـل المسـاعـدة استعمـالاً هـي البـلاتين ( Platinum ) والنيكل .

٣ ـــ يجب أن تكون الأقطاب قـادرة على إيصال الالكتـرونات إلى النهـايات ( Terminals ) كما يجب أن يكون السائل الايـوني ذا نفاذيـة عاليـة ( Highly permeable ) لكـل من ايـونـات ( $H^+$ ) أو ( $OH^-$ ) والتي تتولد كنواتـج وسطية على إحدى الأقطاب .

وينتقل الايون ( $H^+$ أو $OH^-$ ) إلى القطب الآخـر عبر السـائل الايـوني ليتّحد مـع المتفاعل الآخر بينما تنتقل الالكترونات خلال أسلاك الـدائرة الخـارجية إلى القطب الآخر حيث يتكون ناتـج التأكسد .

إذا كانت خلية الـوقود تحـرق الأكسجين والهيدروجين وتحتـوي على محلول ايوني حامضي ـــ الشكل ( ٥ ـ ٧ ) ـــ فإن الايـون الوسطي النـاتـج هو ( $H^+$ ) وتكون تفاعلات الخلية العامة :




**الشكل ( ٥ ـ ٧ )**
**تفاعلات خلية وقود ذات محلول ايوني حامضي**

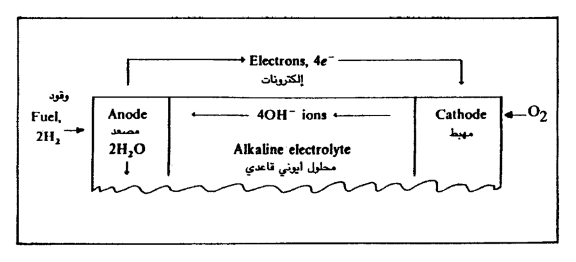
**تفاعل المصعد :**

The anode reaction is: $2\ H_2 \rightarrow 4e^- = 4\ H^+$

**تفاعل المهبط :**

The cathode reaction is: $4e^- = 4\ H^+ + O_2 \rightarrow 2\ H_2\ O$

وإذا كانت خلية الوقود ( أكسجين ـ هيدروجين ) تستخدم محلول ايوني قاعدي ( Alkaline electrolyte ) كهيدروكسيد البوتاسيوم ـ الشكل ( ٥ ـ ٨) ـ فإن الايون الوسطي هو ( $O\ H^-$ ) وتكون تفاعلات الخلية العامة :




**الشكل ( ٥ ـ ٨ )**
**تفاعلات خلية وقود ذات محلول ايوني قاعدي**

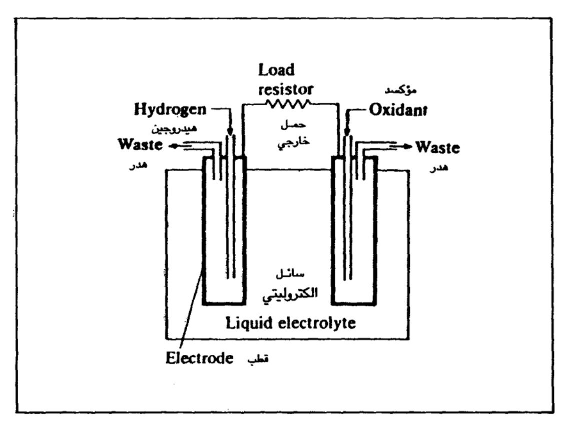
تفاعل المصعد :

The anode reaction is: $2\,H_2 + 4\,OH^- \rightarrow 4\,H_2O + 4e^-$

تفاعل المهبط :

The cathode reaction is: $2\,H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4\,OH^-$

الشكل ( ٥ ـ ٩ ) يبين رسماً تخطيطياً لخلية وقود نموذجية .




الشكل ( ٥ ـ ٩ )
رسم تخطيطي لخلية وقود نموذجية

ـ انواع خلايا الوقود :

معظم خلايا الوقود العاملة هي خلايا ذات درجة حرارة منخفضة تستخدم الهيدروجين والأكسجين كمتفاعلات وتقل درجة حرارتها العاملة عن ٥٠٠ كلفن .

إن تخفيض درجة الحرارة العاملة يحسن الكفاءة التحويلية بينما يزداد

معدل التأكسد أو القدرة الناتجة للخلية بزيادة ضغط أو درجة حرارة النظام أو كليهما . إن خلية الوقود الناجحة يجب أن تحقق شرطين أساسيين ، هما :

١ ــ الثبات : ( Invariance )

وتتضمن هذه الصفات قدرة النظام على الاستمرار بالعمل لفترة طويلة بموثوقية ودون حدوث تلف للعوامل المساعدة نتيجة لوجود الشوائب في المتفاعلات أو انسداد ( Logging ) لمسامات الأقطاب أو تكون للفقاعات أو تداخل واختلاط للمتفاعلات ( Inter diffusion ) .

٢ ــ التفاعلية : ( Reactivity )

وتقتضي هذه الصفة الحصول على أقصى طاقة ممكنة من التفاعلات الكيماوية عند معدلات تفاعل مرتفعة نسبياً ، ولهذا فإنه من المهم أن تتأكسد جميع ذرات الوقود بشكل كامل خلال عمل الخلية ، ويمكن زيادة معدل التفاعل باستعمال أقطاب مسامية كبيرة حتى يكون سطح التفاعل بين الغاز والمحلول الايوني أكبر مايمكن، كما يمكن زيادة معدل التفاعل بزيادة الضغط العامل أو درجة الحرارة العاملة أو كليهما ، ولسوء الحظ فإن الخطوات المتخذة لزيادة معدل التفاعل تتعارض مع متطلبات الثبات للخلية .

## ٥ ـ ٣ ـ ٢ التوليد الكهروضوئي :

يمكن تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية ــ مباشرة ــ إلى طاقة كهربائية بواسطة الخلية الكهروضوئية ( Photovoltaic-cell ) والتي تسمى عادة بالخلية الشمسية ( Solar cell ) . وكما هو الحال بالنسبة لخلية الوقود فإن الكفاءة التحويلية لهذا النظام غير محدودة بكفاءة المحرك الحراري الإرجاعي القصوى التي يحكمها القانون الثاني. وعلى الرغم من ذلك، فإن كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية محدودة بقيم منخفضة نسبياً .

ينصب الاهتمام الأساسي على إمكانية تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية ــ من الشمس مباشرة ــ إلى كهرباء ، فعمل الخلية الكهروضوئية ( الخلية الشمسية) يعتمد على استغلال الوصلة الثنائية P -n (P-n Junction) التي تتكون من مادتين شبه موصلتين ( Semi-Conductors ) .

إن أكثر مادتين شبه موصلتين أهمية في علم الإلكترونيات هما السيلكون ( S i ) والجرمانيوم ( G e ) . يقع هذان العنصران في العمود الرابع من

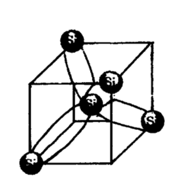
| III (+3) | IV (+4) | V (+5) |
|---|---|---|
| 5 B<br>BORON<br>10.82 | 6 C<br>CARBON<br>12.01 | 7 N<br>NITROGEN<br>14.008 |
| 13 Al<br>ALUMINUM<br>26.97 | 14 Si<br>SILICON<br>28.09 | 15 P<br>PHOSPHORUS<br>31.02 |
| 31 Ga<br>GALLIUM<br>69.72 | 32 Ge<br>GERMANIUM<br>72.60 | 33 As<br>ARSENIC<br>74.91 |
| 49 In<br>INDIUM<br>114.8 | 50 Sn<br>TIN<br>118.7 | 51 Sb<br>ANTIMONY<br>121.8 |

**الجدول ( ٥ ـ ١ )**
**العناصر شبه الموصلة في الجدول الدوري**

الجدول الدوري، ولكل منهما أربع إلكترونات تكافؤ ( إلكترونات حرة في مداره الأخير ) كما هو مبين في الجدول ( ٥ ـ ١ ) ، الذي يوضح جزءاً من الجدول الدوري الذي يظهر فيه هذان العنصران .

يتخذ التركيب البلوري لكل من عنصري السيلكون والجرمانيوم شكلاً رباعي السطوح ( Tetrahedral ) كما هو مبين في الشكل ( ٥ ـ ١٠ ) حيث ترتبط كل ذرة من ذرات البلورة بأربعة ذرات مجاورة لها، كما هو مبين في الشكل (٥ ـ ١١). تلزم طاقة مقدارها حوالى ( 1.1 e V ) للسيلكون وطاقة مقدارها حوالى ( 0.7 e V ) للجرمانيوم لكسر الرابطة التساهمية أو المشتركة في كل منهما .

وعند كسر إحدى الروابط التساهمية في البلورة يتحرر أحد الإلكترونات




الشكل ( ٥ ـ ١٠ )
الشكل رباعي السطوح لبلورة السيلكون

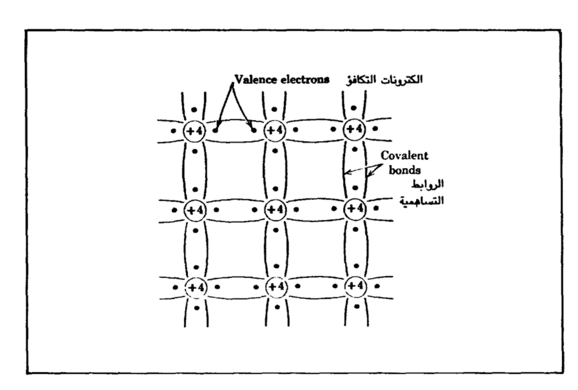
( يصبح حر الحركة في البلورة ) ويترك وراءه فجوة ( Hole ) ذات شحنة موجبة .

ويساهم كل من الإلكترونات الحرة والفجوات في عملية التوصيل الكهربائي بشكل مستقل ، حيث انه يمكن الافتراض بأن الفجوات ـ موجبة الشحنة ـ تتحرك باتجاه معاكس لحركة الإلكترونات الحرة في البلورة . الشكل ( ٥ ـ ١٢ ) يبين بلورة سيلكون بإلكترون حُر وفجوة نتيجة لكسر إحدى الروابط التساهمية .

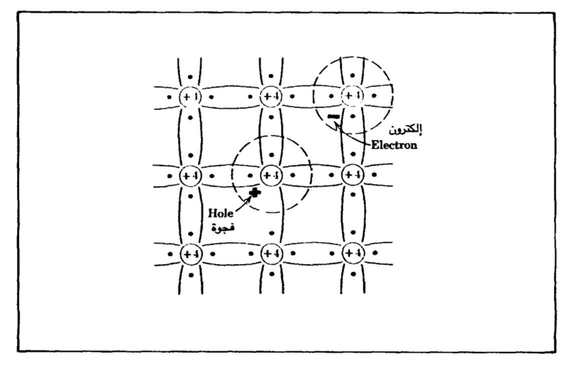
في المادة شبه الموصلة النقية يكون عدد الإلكترونات الحرة مساوياً لعدد الفجوات،وعلى درجات الحرارة العادية فإن جزءاً بسيطاً من إلكترونات التكافؤ تكون جاهزة للتوصيل ( الإلكترونات الحرة ) .

يمكن زيادة تركيز الحاملات الحرة ( Free carriers ) في المادة شبه الموصلة وبالتالي زيادة موصليتها وذلك بزيادة درجة حرارتها ، ويمكن زيادة هذه الموصلية بشكل أكبر ( والتحكم بهذه الزيادة ) بإضافة كميات قليلة من الشوائب ( Impurities ) لهذه المادة في عملية تسمى بعملية التطعيم ( Doping ) .

فعند إضافة كميات قليلة من عنصر له خمس إلكترونات تكافؤ كالفسفور ( P ) إلى عنصر السيلكون النقي فإن ذرات الفوسفور ( المادة الشائبة ) تحل محل بعض ذرات عنصر السيلكون في البلورة وتشارك ذرة المادة الشائبة ذرات السيلكون المجاورة لها بأربعة روابط بينما يبقى الإلكترون الخامس من إلكترونات التكافؤ حراً ، وتسمى المادة الناتجة من عملية التطعيم هذه بالمادة شبه الموصلة




**الشكل ( ٥ ـ ١١ )**
**تمثيل ثنائي ــ البعد لذرات السيلكون في البلورة**




**الشكل ( ٥ ـ ١٢ )**
**بلورة سيلكون برابطة تساهمية غير مكتملة ( مكسورة )**

الواهبة ( Danor ) أو المادة شبه الموصلة من نوع n- ( n-Type ) كما هو مبين في الشكل ( ٥ ـ ١٣ ) .

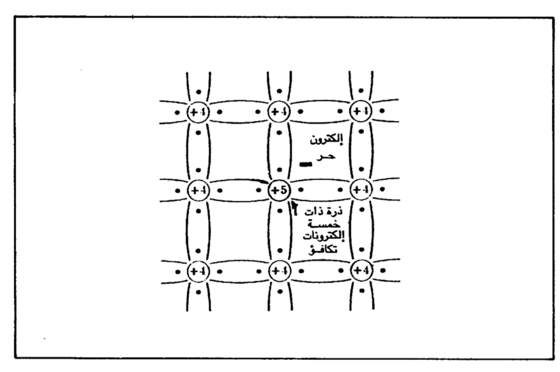
وفي حالة إضافة مادة شائبة ذات ثلاثة إلكترونات تكافؤ كالألمنيوم ( A l ) إلى بلورة السيلكون فإن المادة الناتجة من عملية التطعيم هذه تسمى بالمادة شبه الموصلة القابلة ( Acceptor ) أو المادة شبه الموصلة نوع P-( P-Type ) كما هو مبين في الشكل ( ٥ ـ ١٤ ) .

وكما هو واضح في الشكل فإن المادة الشائبة تشارك بثلاث روابط مع ثلاث ذرات من السيلكون المجاورة لها بينما تبقى الرابطة الرابعة غير مكتملة مما يؤدي إلى إيجاد فجوة ( شحنة موجبة ) في البلورة .

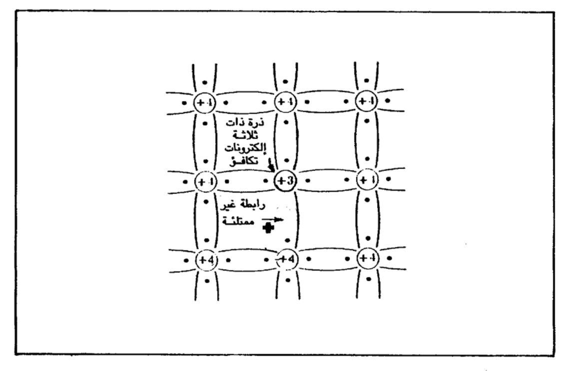
عند إلصاق مادة من نوع n- ( ذات شحنة سالبة ) بأخرى من نوع P- ( ذات شحنة موجبة ) تنتقل الإلكترونات عبر السطح الفاصل ( سطح الالتصاق ) من المادة n- إلى المادة P- لملء الفجوات الموجبة فيها . ونتيجة لهذا الانتقال يرتفع الجهد للمادة من نوع n- وينخفض الجهد للمادة من نوع P- حتى يصل الفرق في الجهد بين المادتين حداً معيناً تتوقف عنده عملية انتقال الإلكترونات عبر السطح الفاصل ، وتسمى الوصلة المؤلفة من مادتين ملتصقتين إحداهما من نوع n- والأخرى من نوع P- بالوصلة الثنائية P-n ( P-n Junction ) . الشكل ( ٥ ـ ١٥ ) يبين رسماً تخطيطياً لوصلة ( P-n ) الثنائية ويظهر الشكل آلية توصيل الشحنات عبر السطح الفاصل بين المادتين شبه الموصلتين .

تتكون الخلية الشمسية عادة من وصلة ( P-n ) ثنائية كما هو مبين في الشكل ( ٥ ـ ١٦ ) .

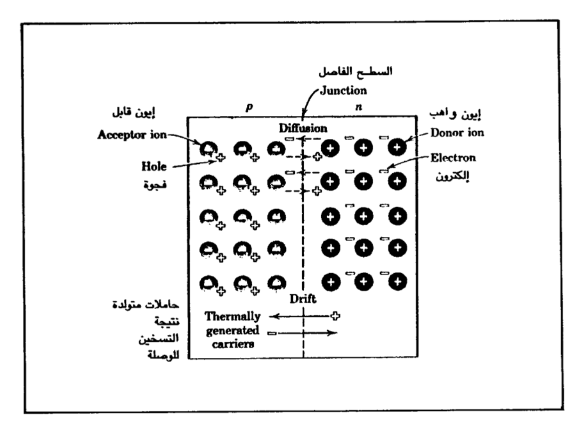
عندما تسقط الفوتونات الضوئية من أشعة الشمس على الخلية الشمسية فإنها تتفاعل مع الإلكترونات الحرة ( إلكترونات التكافؤ ) للوصلة الثنائية ( P-n ) وتكسبها الطاقة اللازمة لإثارتها أو تنشيطها ( Excitation energy ) وينتج عن هذا التفاعل بين الإلكترونات والفوتونات ــ التي تمتلك الطاقة اللازمة للإثارة ــ تجمع للشحنات الموجبة ( الذرات التي فقدت إلكتروناتها ) في شبه الموصل نوع n- . وإذا وصلت المادتان ( n ) و ( P ) بدائرة خارجية فإن الإلكترونات تسري في هذه الدائرة من مادة n- إلى مادة P- لِتُعادل الشحنات الموجبة فيها ، أي أنه يتولد تيار كهربائي في الدائرة الخارجية يسري من مادة P- إلى مادة n- ، وهكذا تقوم هذه الخلية الشمسية بتحويل طاقة الفوتونات إلى طاقة كهربائية .




**الشكل ( ٥ ـ ١٣ )**
**تأثير التطعيم بمادة من عناصر المجموعة الخامسة**




**الشكل ( ٥ ـ ١٤ )**
**تأثير التطعيم بمادة من عناصر المجموعة الثالثة**

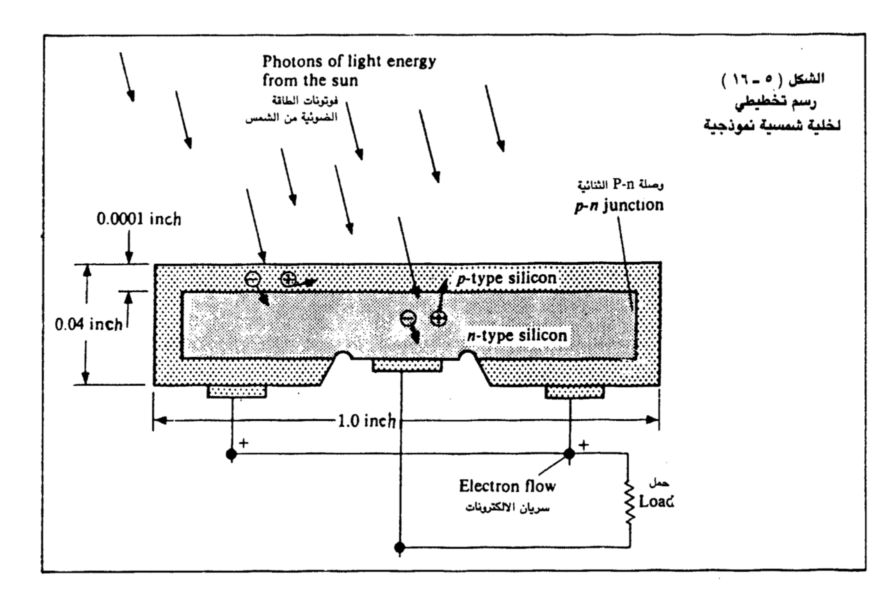



**الشكل ( ٥ ـ ١٥ )**

**رسم تخطيطي لوصلة P-n الثنائية**

هنـاك نوعـان من الفواقـد الرئيسـة هما فقـد الوصلـة ( Junction Loss ) والفقـد الطيفي ( Spectrum Loss ) . ويعود فقـد الوصلـة إلى تدفق الحـامـلات الفرعية ( Minority carriers ) في الوصلة. وعلى الرغم من أن معدل تدفق هذه الحاملات أقل بكثير من معـدل تدفق الحـاملات الـرئيسة ( Majority carriers ) إلا أنه لا يمكن إهماله حيث ان هذا الفقد يخفض كفاءة الخليـة الشمسية بحـوالى ٥٠ ٪ .

أما الفقد الطيفي فيكون مصاحباً لطيف الطاقة للفوتـونات السـاقطة والطـاقة المنشطة لمادة شبه الموصل حيث ان بعض هذه الفوتونـات يمتلك طـاقة أكبـر من تلك اللازمة للإثارة أو التنشيط ( ١,١ إلكترون ـــ فـولت لخلية السيلكـون ) فتتحول الطاقة الزائدة إلى طاقة حرارية وبعضها يمتلك طاقة أقـل من تلك الـلازمة لـلإثارة فتتحول طاقتها إلى طاقة حرارية لا تساهم في توليد الطاقة الكهربائية في الخلية .




الشكل ( ٥ ـ ١٦ )
رسم تخطيطي
لخلية شمسية نموذجية

وهناك عدد من الفواقد الثانوية تصاحب عمل الخلية الشمسية وتشمل انعكاس الفوتونات عن الخلية وعودة الايونات للاتحاد مع بعضها ( Recombination ) قبل وصولها للحد الفاصل بين المادتين (n) و ( P ) والفقد الناتج عن عملية تسخين جول ، خصوصاً في الطبقات الخارجية للمادة شبه الموصلة . وبأخذ جميع الفواقد بعين الاعتبار ، فإن أقصى كفاءة ممكنة للخلية هي ٢٥ ٪ بينما تتراوح الكفاءة العملية المعروفة للخلايا الشمسية المستخدمة ما بين ١٥ ـــ ٢٠ ٪ .

وللخلايا الشمسية عدد من الفوائد ـــ مقارنة مع أنظمة التحويل الشمسية الأخرى ـــ فهي بسيطة وصغيرة الحجم ولها نسبة ( قدرة / وزن ) عالية مما يجعل استخدام هذه الخلايا مغر في التطبيقات الفضائية . كذلك فإن الخلايا الشمسية ليس بها أجزاء متحركة ولها كفاءة تحويلية عالية ـــ من طاقة شمسية إلى طاقة كهربائية ـــ .

نظرياً ، فإن عمر الخلية الشمسية غير محدود ، وعملياً فإنها تعاني مع الزمن من تلف شعاعي ناتج عن جسيمات عالية الشحنة قادمة من الفضاء مثل الإلكترونات الناتجة عن حزام فان ألن الإشعاعي حول الأرض ( Van Alen radiation belt ) .

أهم مشاكل الخلايا الشمسية هو تكاليف إنتاجها الباهظة وتصنيعها، كذلك الحاجة إلى وجود نظام تخزين لهذه الخلايا وذلك لتوفير الطاقة الكهربائية في الليل وفي الأيام الغائمة .

## ٥ ـ ٣ ـ ٣ التوليد باستخدام طاقة الرياح :

إن أهم ما يميز الرياح كمصدر لتوليد الطاقة الكهربائية هو أن الطاقة الموجودة في الرياح تتناسب مع مكعب سرعة هذه الرياح . فالقدرة التي تمتلكها كتلة من الرياح مقدارها ( m ) وتتحرك بسرعة مقدارها ( V ) وكثافتها مقدارها ( $\rho$ ) وتمر خلال مروحة هوائية ذات محور دوران أفقي ( Horizantal axis wind turbine ) مساحتها (المساحة الدائرية التي تشملها شفرات المروحة خلال دورانها ) مقدارها ( A ) هي :

$$Power = \frac{1}{2} \rho A V^3 \qquad (٥ - ٩)$$

وقد أظهرت الحسـابات التي قـام بها البـاحث بتز ( Betz ) عـام ١٩١٩ أن اقصى نسبة من الطاقة الحركية التي يمكن استخلاصها من الريـاح تساوي ١٦ / ٢٧ (٠,٥٩٣ ) من القدرة الموجودة ، وهكذا فإن القدرة العظمى للتوربين الهوائي :

Theortical maximum power out put = $0.297\, \rho\, A\, V^3$ ( ١٠ ـ ٥ )

ولكن الفواقد التي تصاحب عمليات تحـويل الطـاقة تؤدي إلى تخفيض هـذه القيمة بنسب متفاوتة حسب نوع التـوربين الهوائي ، وتبلـغ نسبـة التخفيض عادة حوالى ثلثي النسبة النظرية العظمى .

أي أن :

Available power out put = $\left(\frac{2}{3}\right) 0.297 \rho\, A\, V^3 \simeq$ ( ١١ ـ ٥ )
$V^3\, 0.2 \rho\, A$

وإذا افترضنا أن قطر المروحة الهوائية هو ( D ) ، فإن المعادلة (٥ ـ ١١) تصبـح :

Available power out put = $0.05\, \pi \rho\, D^2\, V^3$ ( ١٢ ـ ٥ )

ومن هذه المعادلة نجد أن قدرة الرياح المتوافرة عند سـرعة معينـة تتناسب مـع مربـع قطر المروحة الهوائية

ومن المتغيرات الشائع استعمالها في حسابات طاقة الريـح :

معامل القدرة ( Power coefficient $C_p$ )

$$C_p = \frac{\text{Power out put of wind turbine}}{\frac{1}{2} \rho\, A\, V^3} \quad (١٣ ـ ٥)$$

ومعامل القدرة الكلي ( Overall power coefficient $C_{po}$ )

$$C_{po} = \frac{\text{Power out put at generator}}{\frac{1}{2} \rho\, A\, V^3} \quad (١٤ ـ ٥)$$

ومن المعادلة الأخيرة نجد أن معامل القدرة الكلي يشمل الفواقد الناتجة عن

عمليات نقل القدرة ــ بواسطة التروس ــ وكفاءة التحويل للمولد الكهربائي .

ولتوليد تيار كهربائي متردد ( A C ) ، فإن التوربين الهوائي يجب تصميمه للعمل بسرعة دورانية ثابتة وذلك للحصول على تردد ثابت للتيار .

وهناك عدة أنواع من التوربينات الهوائية، وتشمل هذه الأنواع التوربينات ذات السريان المحوري ( Axial flow turbines ) والتوربينات ذات السريان القطري ( Radial turbines ) المربوطة على محور عمودي . الشكل ( ٥ ـ ١٧ ) يبين نوعين من مراوح ( الأعضاء الدوارة ) التوربينات الهوائية .

يجب تصميم التوربينات الهوائية بحيث تكون نسبة ( القدرة / الوزن ) أكبر ما يمكن لتقليل الاجهادات المتولدة في شفرات المروحة الهوائية الناتجة عن قوة الطرد المركزي .

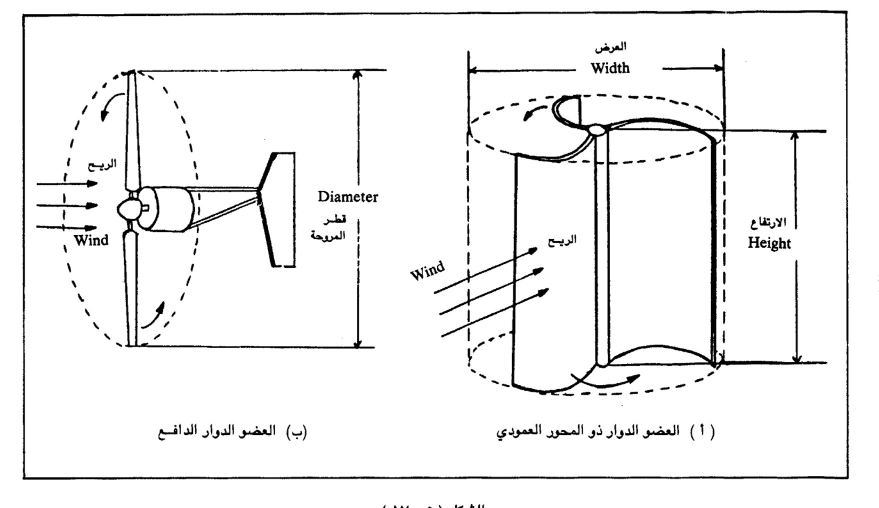
يواجه نظام توليد الطاقة الكهربائية من طاقة الريح بعض المشاكل التي لا يمكن تجنبها ، فإذا كان الغرض هو توليد تيار كهربائي متردد ( A C ) فإن ذلك يتطلب توافرسرعة دورانية ثابتة وقوة ثابتة لمروحة التوربين ، ولسوء الحظ فإن سرعة الرياح ليست ثابتة لا في المقدار ولا في الاتجاه، كذلك فإنها تتغير من قاع إلى قمة المروحة في حالة كون المروحة الهوائية ذات قطر كبير نسبياً مما يؤدي إلى عدم ثبات سرعة المولد ، كذلك فإنه يخلق إجهادات داخلية متغيرة في شفرات المروحة تؤدي إلى اضعافها وإجهادها مع الزمن .

وأحياناً تضعف سرعة الرياح لدرجة أنها لا تكفي لتوليد الطاقة الكهربائية مما يقتضي وجود نظام تخزين للطاقة .

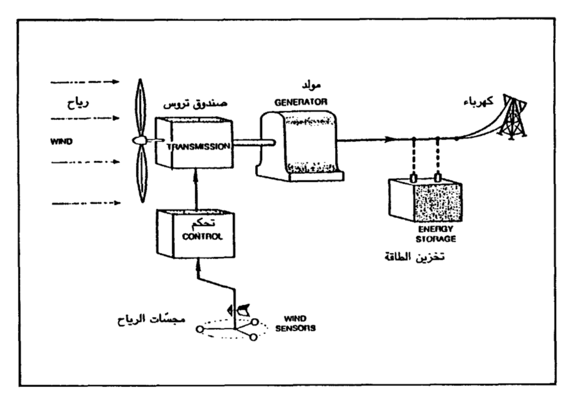
وعلى الرغم من جميع هذه المشاكل فإن توليد الطاقة من الريح ــ خصوصاً الطاقة الكهربائية ــ يلاقي اهتماماً وتستمر البحوث بصدده وذلك لكون طاقة الريح طاقة نظيفة وغير ملوثة للبيئة . الشكل ( ٥ ـ ١٨ ) يبين رسماً تخطيطياً لنظام توليد للطاقة الكهربائية باستخدام طاقة الرياح .

ويمكن تصنيف التوربينات الهوائية حسب معدلات القدرة المنتجة إلى ثلاثة أقسام :

١ ــ صغيرة ــ من صفر ــ ٩ كيلوواط ــ .
٢ ــ متوسطة ــ من ١٠ ــ ٩٩ كيلوواط ــ .




الشكل ( ٥ ـ ١٧ )
بعض انواع المراوح الهوائية




**الشكل ( ٥ ـ ١٨ )**
**رسم تخطيطي لنظام توليد كهربائي باستخدام طاقة الرياح**

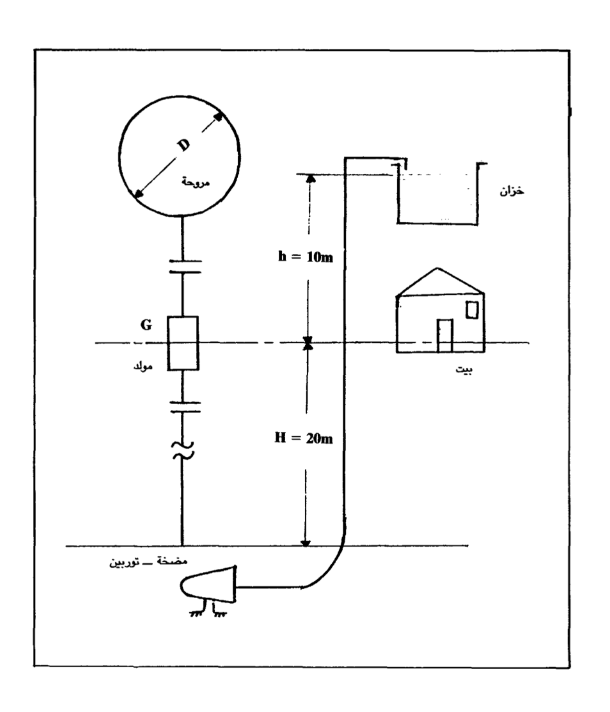
٣ ــ كبيرة ــ من ١٠٠ ــ ٣٠٠٠ كيلوواط ــ .

وحسب التركيب تصنف إلى :

١ ــ توربينات المحور الأفقي ( Horizantal axis ) .
٢ ــ توربينات المحور العمودي ( Vertical axis ) .

**مـثـال :**
**طاحونة هوائية تستخدم لضخ المياه من عمق ٢٠ متراً باستعمال مضخة طاردة مركزية .**

**يخزن الماء المضخ في خزان يرتفع عشرة أمتار عن سطح الأرض وذلك لاستعماله عند توقف الريح . ويمكن أن تعمل المضخة كتوربين ــ إذا عكس اتجاه التدفق للمياه ــ يتصل بمولد كهربائي يزود بيتاً بطاقة كهربائية مقدارها ١٢٠ كيلوواط ــ ساعة في اليوم . كفاءة نظام الضخ ( المضخة /**




التـوربين والأنابيب ) ٥٠ ٪ وكفـاءة النظام الكهـربائي ( المـولـد والأسـلاك ... ) ٨٠ ٪ .

( أ ) احسب أبعاد خزان الماء بحيث يكون حجمـه كافٍ لتشغيـل المولـد الكهربائي لمدة ثلاثة أيام من دون وجود رياح. افترض أن قطر الخزان مساوٍ لارتفاعه .

(ب) بافتراض أن قطر المروحة الهوائيـة ( D ) وأن معامـل القدرة أكبـر ما يمكن وأن سرعـة الريـاح تساوي ١٦ كم / ساعة. احسب قطـر المـروحة ، بحيث ان هـذه المروحـة تكون قـادرة على تزويـد البيت بالكهرباء وتعبئة خزان الماء ( معاً ) في يوم واحد .

( أ )

$$\frac{120\ Kw - h}{day} \times 3\ days = 360\ Kw - hr$$
$$= 1.296 \times 10^9\ J$$

Energy = $m\, g\, H_t$ but $m = \rho\, (Vol)$

Energy = $\rho\, (Vol)\, g\, (H + h)\, \eta_m\, \eta_e$

Vol = الحجم

$\eta_m$ = كفاءة نظام الضـخ

$\eta_e$ = كفاءة النظام الكهربائي

$$1.296 \times 10^9 = 1000 \times 9.81 \times 30 \times 0.5 \times 0.8 \times Vol$$

$$Vol = 11020.4\ m^3$$

$$Vol = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) D$$

$$11020.4 = \frac{\pi D^2}{4}\ D$$

$$D = 24.1\ m$$

(ب) أقصى معامل قدرة $C_p = 16 / 27$

Theortical maximum power out put

$$= \frac{16}{27}\left(\frac{1}{2}\rho\, V^3\, A\quad\right)$$

= Water power +Electrical power

Theortical maximum power out put

$$= \frac{\rho g Q (H + h)}{\eta_m} = \frac{120 \text{ Kw} - \text{hr} \times 1000}{24 \text{ hr} \times \eta_e}$$

$$Q = \frac{Vol}{t} = \frac{11020.4 \text{ m}^3}{3 \times 24 \times 3600 \text{ s}} = 0.0425 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$V = 16 \text{ Km / hr} = 4.44 \text{ m / s}$ سرعة الرياح

$\rho = 1.126 \text{ kg / m}^3$ كثافة الرياح

$$\frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \times 1.126 \times (4.44)^3 \frac{\pi}{4} D^3\right)$$

$$= \frac{1000 \times 9.8 \times 0.0425 \times 30}{0.5} + \frac{120 \times 1000}{24 \times 0.8}$$

$D^2 = 1362.1 \text{ m}^2$

$D = 36.91 \text{ m}$

• • •

# الفصـل السـادس

# تخزين الطاقة Energy Storage

# ٦ ـ ١
# مقدمة الفصل السادس

يمكن تخزين الأشكال الرئيسة الستة للطاقة ــ بشكل ما ــ باستثناء الطاقة الكهرومغناطيسة التي لا يمكن تخزينها بأي شكل ، فهي شكل نقي للطاقة الانتقالية .

تُعد عملية تخزين الطاقة عملية هامة وضرورية جداً ــ أحياناً ــ في الكثير من أنظمة توليد القدرة ، فأنظمة توليد القدرة من الطاقة الشمسية تتطلب إما نظاماً لتخزين الطاقة أو مصدراً بديلاً لتزويد الطاقة عندما لا يكون هناك إضاءة شمسية كافية لتوليد الطاقة .

وهناك اعتبارات عديدة يجب مراعاتها عند اختيار وتصميم وتشغيل نظام لتخزين الطاقة :

١ ــ الكفاءة الكلية للنظام والتي تشمل عملية الشحن ( Charging process ) وفواقد التخزين ( Storage loss ) وعملية استرجاع الطاقة ( Recovery process ) .

٢ ــ كثافة تخزين الطاقة وتقاس بوحدات كيلوجول / متر مكعب ( $KJ / m^3$ ) أو تخزين الطاقة النوعي ويقاس بوحدات كيلوجول / كيلوغرام ( KJ / kg ) .

٣ ــ معدلات الشحن والاسترجاع ( التفريغ ) القصوى .

٤ ــ إقتصادية عملية التخزين .

٥ ــ المشاكل البيئية المصاحبة لعملية التخزين .

٦ ــ عدد مرات تشغيل ــ شحن واسترجاع الطاقة ــ نظام التخـزين وعمر هذا النظام .

# ٦ ـ ٢
# تخزين الطاقة الميكانيكية

## ٦ ـ ٢ ـ ١ تخزين طاقة الحركة : ( Kinetic Energy Storage )

الطاقة الحركية هي الطاقة المصاحبة لحركة كتلة معينة بالنسبة لأخرى ، وفي حالة السرعة الخطية ( Linear Velocity ) فإن طاقة الحركة المصاحبة لكتلة مقدارها ( m ) تتحول بسرعة خطية مقدارها ( V ) تعطى بالمعادلة :

$$K E = \frac{1}{2} m V^2 \qquad (١ - ٦)$$

حيث :

m : كتلة الجسم ( kg ).

V : سرعة الجسم الخطية ( m / s ) .

أما في حالة الحركة الدورانية ، فإن طاقة الحركة يمكن تخزينها في عجلة التطاير أو الحدّافة ( Fly wheel ) كالحدّافة الموجودة في السيارات والتي تخزن طاقة الحركة خلال الأشواط الفعّالة ( أشواط القدرة ) لاستخدام هذه الطاقة في الأشواط غير الفعالة،وتعطى هذه الطاقة بالمعادلة :

$$K E = \frac{1}{2} I \omega^2 \qquad (٢ - ٦)$$

حيث :

I : عزم القصور الذاتي ( Moment of inertia ) للحدّافة

ويعطى بالمعادلة :

$$I = \int_{O}^{R} r^2 dm$$

حيث :

R : نصف قطر حافة العجل ( m ) .

m كتلة الحافة للعجل ( kg ) .

ω : السرعة الزاوية للعجلة ( rad / S ) .

إن تخزين طاقة الحركة في عجلة التطاير يقتضي أن تُصنع هذه العجلة من مادة ذات مقاومة ( قوة ) ميكانيكية عالية وذلك لتحمل الإجهادات العالية التي تتولد نتيجة لقوة الطرد المركزي المصاحبة للسرعات الدورانية العالية للعجلة .

## ٦ ـ ٢ ـ ٢ تخزين طاقة الوضع :
## ( Potential Energy Storage )

إن تخزين طاقة الوضع هو إحدى أقدم الطرق المستعملة وتشمل الزنبركات ( Springs ) وأنظمة الأوزان ( Weight systems ) والغازات المضغوطة ( Compressed gases ) ومعظم هذه الأنظمة ذات سعات تخزين منخفضة وتُستخدم لتشغيل بعض أنواع الساعات الميكانيكية الكبيرة وساعات اليد والألعاب وغيرها من الأنظمة التي تتطلب سعات تخزين قليلة وأنظمة تخزين صغيرة الحجم .

من ناحية أخرى فإن بعض أنظمة تخزين طاقة الوضع مثل الأنظمة الكهرومائية وأنظمة الغاز المضغوط التي تستخدم المضخات والضواغط تعتبر ذات سعات تخزين هائلة .

إحدى الأنواع العامة لتخزين طاقة الوضع هو الزنبرك، وفي حالة الزنبرك الخطي ( معامل المرونة ثابت ) فإن الطاقة المختزنة في الزنبرك :

$$P E = \frac{1}{2} K X^2 \qquad (٦ـ٣)$$

حيث :

k : ثابت المرونة للزنبرك ( N / m ) .

X : الاستطالة للزنبرك ( m ) .

أمـا الأنظمة التي تستخـدم الكتلـة لتخـزين طـاقـة الـوضـع فـإنهـا تعمـل ـــ ببساطة ـــ على رفـع كتلة معينة إلى ارتفاع معين ضد قـوة الجاذبية الأرضية، وهكذا فإن طاقة الوضـع المختزنة في هذه الكتلة :

$$P\,E = mg\,\Delta Z \qquad (٦ - ٤)$$

حـيـث :

m : الكتلة ( kg ) .

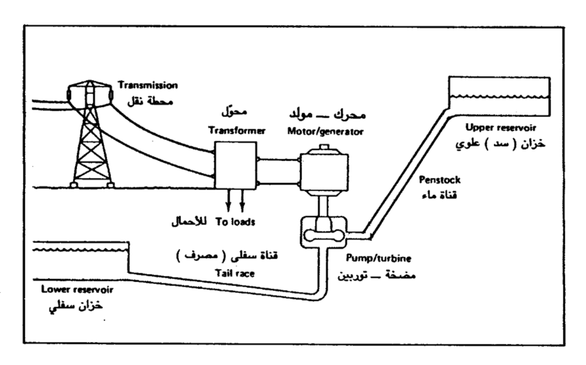
g : تسارع الجاذبية الأرضية ( $g = 9.81\ m / S^2$ ) .

$\Delta Z$ : فرق الارتفاع ( m )

لتخزين ١ كيلوواط ـــ ساعة من الطاقة على شكل طاقة وضع فإنه يلزم رفع كتلة مقدارها ( 1000 kg ) لارتفـاع مقداره ( 367 m ) ويستعمـل هذا النظـام لتخزين كميـات كبيرة من الطـاقة وذلـك بضـخ كميات كبيـرة من الماء إلى ارتفـاع معقول يسمى بنظام تخزين الطاقة بالضخ ( Pumped-Storage Energy System ) . في هـذا النظام يستعمـل نظام تـوربين ـــ مضخة إرجـاعي ( انعكاسي) كهـرومـائي ( Reversible hydruelectric generator-pump ) حيث يتم ضـخ الميـاه مـن بحيرة أو نهر إلى خزانات ضخمة أو سدود خاصة على ارتفاعات عالية وذلـك خلال فترة انخفاض الطلب على الكهرباء ( الطاقة ) ويعاد استعمال هـذه المياه ( يعمـل النظـام كتـوربيـن ) خـلال فتـرة الطلـب الأقصـى ( الـذروة ) علـى الطـاقـة ( Peak demand ) وبـذلـك يتم استـرجـاع معظم الطـاقـة المختـزنـة . الشكـل ( ٦ - ١ ) يبين رسماً تخطيطياً لنظام تخزين الطاقة بضخ المياه إلى خزانات ضخمة ( Reservoir ) مرتفعة .

إن معظم الفـواقد في نظـام التخزين هـذا تحدث في التـوربين عنـد عملـه كمضخـة أو توربين ، وتصل كفـاءته في الحـالتين إلى ٩٠ ٪ مما يعني أن كفـاءة الدورة الكاملة ( عملية الضـخ وعملية تشغيل التـوربين ) هي ٠,٩ × ٠,٩ = ٠,٨١ وهناك أيضاً فواقد الاحتكاك في الأنابيب والتي تؤدي إلى انخفاض الكفاءة الكليـة للنظام لتصل إلى ٦٥ ـــ ٧٥ ٪ .

ومن الوسائل الأخرى المستعملة لتخزين طـاقة الـوضـع ـــ بواسطـة أنظمة



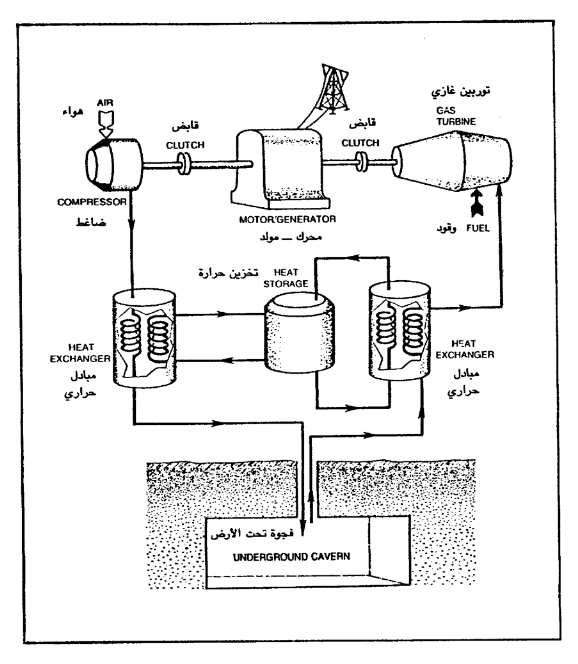

**الشكل ( ٦ ـ ١ )**
**رسم تخطيطي لنظام تخزين الطاقة بواسطة**
**ضخ المياه إلى سدود أو خزانات خاصة**

التخزين بالضخ ـــ (- Pumped-storage systems ) ، هي تخزين الطاقة عن طريق الغاز المضغوط .

وفي هذا النظام يتم ضخ الهواء المضغوط ـــ بواسطة ضواغط ـــ إلى فجوات ضخمة تحت الأرض كمنجم مهجور أو أبار بترول أو غاز طبيعي مهجورة أو كهف طبيعي كبير أو حفرة صناعية .

وتتم عملية الضخ للهواء خلال فترة انخفاض الطلب على الطاقة ، ثم يعاد سحب الهواء المضغوط خلال فترة الطلب الأقصى ( الذروة ) على الطاقة حيث يتم خلطه مع الوقود وحرقه ، ثم تؤخذ الغازات المحترقة المضغوطة إلى توربينات غازية حيث تتمدد هذه الغازات المحترقة لتنتج القدرة المطلوبة خلال فترة الحمل الأقصى أو حمل الذروة ( Peak Loud ) للمحطة ، كما هو مبين في الشكل ( ٦ ـ ٢ ) .

يتناسب حجم الهواء المخزن في هذه العملية تناسباً طردياً مع كمية الطاقة المراد تخزينها وعكسياً مع ضغط الهواء المخزن ، ومن الأفضل المحافظة على




**الشكل ( ٦ ـ ٢ )**
**نظام تخزين الطاقة تحت الأرض باستخدام الغاز المضغوط**

ضغط الهواء المخزن ، ثابتاً قدر الإمكان وذلك لتحقيق أقصى كفاءة ممكنة لكل من الضاغط والتوربين ويمكن عمل ذلك باستغلال ماء بحيرة أو نهر أو خزان ضخم وذلك بغمر مكان التخزين ( الفجوة ) بالماء ، ثم يتم بعد ذلك ضخ الهواء المضغوط إلى الفجوة لطرد المياه باتجاه معاكس عبر خط التزويد إلى مصدرها .

ويساعد الضغط الهيدروليكي المتولد من هذه العملية في المحافظة على ضغط الغاز ثابتاً إلى حد كبير عند إضافة أو سحب الهواء من الفجوة ( مكان التخزين ) .

# ٦ ـ ٣

# تخزين الطاقة الكيميائية

في الواقع فإن الطاقة الكيميائية هي نوع مخزن من الطاقة وهي أكثر أشكال الطاقة المخزنة كثافة حيث ان قيمة تخزين الطاقة النوعي ( القيمة الحرارية كيلوجول / كغم) لهذا الشكل من الطاقة هي الأعلى من بين بقية الأشكال المخزنة باستثناء الطاقة النووية .

فجميع أنواع وقود المستحاثات والتي تشكل المصدر الرئيس للطاقة في العالم في وقتنا الحاضر إنما هي طاقة كيميائية مخزنة .

تعتبر عملية تخزين الهيدروجين بشكله الذري ( H ) أو الجزيئي ( $H_2$ ) العملية الرئيسة لتخزين الطاقة الكيميائية، ويرى بعض المختصين أن الجنس البشري سيتحول في اعتماده على الطاقة إلى الهيدروجين كمصدر رئيس للطاقة عند نفاد الاحتياطي من وقود المستحاثات .

يعتبر الهيدروجين نوعاً ممتازاً من الوقود ، وذلك لأن ناتج احتراقه الرئيس هو الماء ويمكن أن يعاد استخلاصه من الماء مرة أخرى بطرق معينة ليعاد حرقه .

تطورت الأنظمة المستخدمة في انتاج وتخزين الهيدروجين تطوراً كبيراً ، ومن الطرق المتبعة في تخزين الهيدروجين تخزينه على شكل غاز عند ضغط مرتفع أو كسائل عند درجات حرارة منخفضة ، ويمكن تخزينه كذلك في هدريدات المعادن ( Metal hydrides ) . الجدول ( ٦ ـ ١ ) يبين خصائص بعض هذه الهدريدات .

ولكون غاز الهيدروجين ذا كفاءة منخفضة فإن تخزين كمية معقولة من الطاقة لهذا الغاز تحتاج لضغطٍ عالٍ جداً أو حجم كبير .

| Hydride | Hydrogen Storage by Weight (%) | Energy Density (J/g) |
|---|---|---|
| $MgH_2$ | 7 | 9.916 |
| $MgNiH_4$ | 3.2 | 4.477 |
| $FeTiH_{1.95}$ | 1.75 | 2.469 |
| Liquid hydrogen | 100 | 141.838 |
| Gaseous hydrogen | 100 | 141.838 |

**الجدول ( ٦ ـ ١ )**
**خصائص بعض هدريدات المعادن**

وتتطلب عملية إسالة الهيدروجين ( Liquifaction ) طاقة كبيرة تضيف حوالى ٣٠ ٪ إلى تكاليف إنتاج وتخزين الهيدروجين .

أما عملية تخزين الهيدروجين في هدريدات المعادن ، فإنها تكون على حساب فواقد حرارية وأوزان كبيرة بالإضافة إلى مشكلة تلوثه وإفساده ( Contamination ) أو إفساد الهدريدات بواسطة الأكسجين أو الماء أو كليهما مما يؤدي إلى انخفاض السعة التخزينية للهيدروجين بشكل كبير .

ويمكن إنتاج الهيدروجين من عدة تفاعلات كيميائية من أشهرها التحليل الكهربائي للماء ( Electrolysis ) حيث يمرر تيار مباشر خلال محلول سائل موصل ( ايوني ) مما يؤدي إلى إنتاج الهيدروجين على أحد الأقطاب والأكسجين على القطب الآخر، وتصل كفاءة هذه العملية الفعلية إلى ٨٥ ٪ ولكن لكون الكهرباء هي العامل المستعمل في التحليل والتي هي أصلاً محولة عن طاقة ميكانيكية التي هي بدورها محولة عن طاقة حرارية فإن الكفاءة الكلية الفعلية لإنتاج الهيدروجين تنخفض إلى ٣٥ ٪ .

وحيث انه بالإمكان تحضيره بسهولة أكبر من وقود المستحاثات وبكفاءة تحويلية أعلى فإن طريقة التحليل الكهربائي للماء تستعمل فقط عندما يكون الغرض هو الحصول على هيدروجين نقياً جداً .

معظم الهيدروجين المنتج في الوقت الحاضر يحضر من الميثان في عملية إعادة تشكيل البخار ( Steam reforming process ) والتي تجري عند درجة حرارة ٩٠٠°س. ويستخدم هذا النظام غاز الميثان لإنتاج الهيدروجين حسب التفاعل :

$$CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$$

وهذا التفاعل هو تفـاعل مـاص للحرارة ( Endothermic ) ويتطلب حـرارة مقدارها حوالى ( $30\,KJ / K\,mol\ of\ CH_4$ ) ، أما أول أكسيـد الكربـون المنتـج في هذا التفاعل فإنه يستعمل لإنتاج المزيد من الهيدروجين حسب التفـاعل ــ يتم عند درجة حرارة ٤٠٠° س ــ .

$$CO + H_2 \rightarrow H_2 + CO_2$$

وهناك بحوث متعددة لإنتاج الهيدروجين بطرق أخرى مختلفة .

# ٦ ـ ٤
# تخزين الطاقة الكهربائية

يعتبر المركم أحد أجهزة تخزين الطاقة الكهربائية حيث انه يخزن الطاقة الكهربائية على شكل طاقة كيميائية ، فعند شحن المركم تتحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة كيميائية في تفاعل كيميائي ماصٍ للحرارة ، وعند تفريغه فإن المتفاعلات تتحد بعضها مع بعض في تفاعل طارد للحرارة ينتج الطاقة الكهربائية بشكل مباشر .

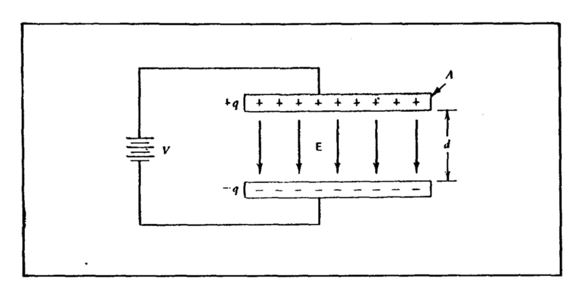
يتم تخزين الطاقة الكهربائية ككهرباء في مجالات كهربائية ساكنة ( Electrostatic fields ) أو مجالات طاقة حثية ( Inductive energy fields ) .

**١ ــ تخزين الطاقة الكهربائية في مجال كهروساكن :**

إذا وصلت صفيحتان متوازيتان موصِلتان مساحة كل منهما ( A ) والمسافة بينهما مفرغة Vacuum ( d ) بمركم له قوة دافعة كهربائية ( V ) كما هو مبين في الشكل ( ٦ ـ ٣ ) فإن الشحنات الكهربائية ستتوزع بحيث ان كل صفيحة تحمل شحنة كهربائية مساوية لشحنة الصفيحة الأخرى بالمقدار ومخالفة لها بالإشارة . ويكون فرق الجهد النهائي ( V ) بين الصفيحتين مساوياً للقوة الدافعة الكهربائية للمركم ( e m f ) ويتولد مجال كهربائي منتظم ( E F ) ــ بإهمال تأثيرات الحوافي للصفيحتين ــ بينهما .

وبما أن هناك شغلاً يبذل لإعادة توزيع الشحنات بشكلها النهائي فإن هذا يعني إن المجال الكهربائي في الفراغ بين الصفيحتين يعمل كخازن للطاقة .

يُسمى الجهاز المبين في الشكل (٦ ـ ٣ ) بالمكثف ( Capacitor ) الكهربائي، كما يطلق على النسبة بين الشحنة الكهربائية ( q ) إلى فرق الجهد




الشكل ( ٦ ـ ٣ )
مكثف كهربائي ذو صفيحتين متوازيتين

( V ) اسم السعة الكهربائية ( Capacitance ) وتقاس هذه السعة بوحدة الفاراد ( Farad ) .

الطاقة الكهربائية المخزنة في المكثف :

$$E_c = \frac{1}{2} C V^2 \qquad (٦ - ٥)$$

حـيـث :

C : السعة الكهربائية بالفاراد

V : فرق الجهد النهائي بين صفيحتي المكثف بالفولت

في حالة مكثف الصفيحتين المتوازيتين فإن السعة الكهربائية :

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \qquad (٦ - ٦)$$

حـيـث :

$\epsilon_0$ : سماحية ( Permittivity ) الفراغ

$$( \epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{Farad}{m} )$$

وتعطى شدة المجال الكهربائي ( E F ) بين صفيحتي المكثف .

بالمعادلة :

$$E F = \frac{V}{d} = \frac{q}{C d} \qquad (٦ - ٧)$$

وبالاستعانة بالمعادلة ( ٦ ـ ٦ ) فإن :

$$E F = \frac{q}{\epsilon_0 A} \qquad (٦ - ٨)$$

وإذا مُلىء الفراغ بين الصفيحتين بمادة عازلة فإن سماحية الفراغ ( $\epsilon_0$ ) تستبدل بسماحية تلك المادة ( $\epsilon$ ) .

من خصائص المكثف الكهربائي ، أنه يبقى محتفظاً بالشحنات الكهربائية لفترة من الزمن بعد فصله عن مصدر الجهد الكهربائي إذا كان هذا المكثف معزولاً بشكل جيد .

تعتمد كمية الطاقة التي يختزنها المكثف الكهربائي على حجمه ونوعية المادة العازلة المستخدمة والتي تصنف حسب النسبة بين سماحيتها إلى سماحية الفراغ ( $\epsilon / \epsilon_0$ ) وتسمى هذه النسبة بثابت العازلية ( K ) (Dielectric Constant ) . الجدول ( ٦ ـ ٢ ) يبين ثابت العازلية ( K ) وشدة العازلية ( Dielectric strength ) لبعض المواد .

**مثال :**

ما هي مساحة مكثف كهربائي ذي صفيحتين متوازيتين يفصل بينهما مسافة مقدارها ٥ مم ووسط عازل مصنوع من الورق ( Paper ) إذا كان هذا المكثف يختزن طاقة مقدارها ٣,٦ × ١٠$^{٣}$ كيلوجول .

من الجدول ( ٦ ـ ٢ ) فإن أقصى انحدار للمجال الكهربائي ( Electric field gradient ) هو 14 K V / m m

ولهذا فإن أقصى فرق جهد :

$$V_{max} = 14 \frac{K V}{m m} \times 5 \, m m = 70 \, K V$$

| Insulator | $\epsilon / \epsilon_0$ Dielectric Constant | Dielectric Strength (kV/mm) |
|---|---|---|
| Vacuum | 1.00000 | ∞ |
| Air | 1.00054 | 0.8 |
| Nylon | 3.5 | 59 |
| Paper | 3.5 | 14 |
| Pyrex glass | 4.5 | 13 |
| Polyethylene | 2.3 | 50 |
| Teflon | 2.1 | 60 |
| Titanium dioxide | 100 | 6 |

الجدول ( ٦ ـ ٢ )
ثابت العازلية وشدة العازلية لبعض المواد

$$E_c = \frac{C\,V^2}{2}$$

$$3.6 \times 10^6 = \frac{C\,(\,70 \times 10^3\,)^2}{2}$$

$$C = 0.001469 \text{ farad}$$

من الجدول ( ٦ ـ ٢ ) فإن ثابت العازلية لمادة الورق $\epsilon / \epsilon_0 = 3.5$

بإعادة كتابة المعادلة ( ٦ ـ ٦ ) على النحو :

$$C = \frac{\epsilon_0\,(\frac{\epsilon}{\epsilon_0})\,A}{d}$$

$$0.001469 = \frac{8.85 \times 10^{-12}\,(\,3.5\,)\,A}{0.005}$$

مساحة لوح المكثف :

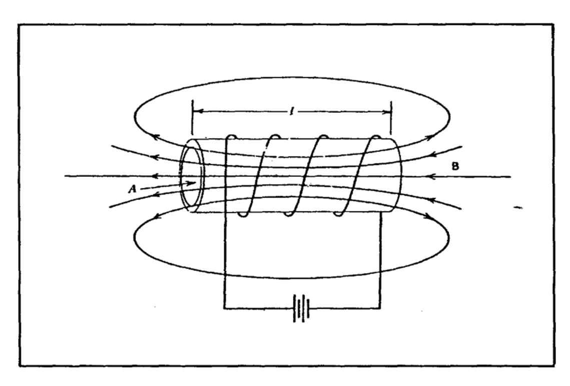
$$A = 2.371 \times 10^5 \text{ m}^2$$

وهذا يعني أنه لو كان لوح المكثف مربـع الشكل فإن طول ضلعه L هو :

$$L = \sqrt{2.371 \times 10^5}$$
$$= 486.93 \text{ m}$$

### ٢ ــ تخزين الطاقة الكهربائية في مجال حثي :

إذا وصـل ملـف لـولبـي ذو قلـب ( مـركـز ) هـوائـي ( Air core coil or solenoid ) بمركم كما هو مبين في الشكل ( ٦ ـ ٨ ) فإنه بعد فترة من الـزمن يحصل ما يلي :




الشكل ( ٦ ـ ٨ )
ملف لولبـي ( طول اللفات ℓ ومساحة المقطـع A )

١ ــ يتولد تيار ثابت ( I ) في الدائرة .

٢ ــ يتولد مجال مغناطيسي ثابت في وحول الملف اللولبـي .

لتوليد المجال المغناطيسي المذكور فـإنه يلـزم شغل ( طـاقة ) وذلـك بسبب تولد قوة دافعة كهربائية معاكسـة للتيار في البـداية ، وتعتمـد هذه القـوة الدافعـة

الكهربائية ( e m f ) على معدل تغير التيار الذي يعتمد بدوره على الخصائص الفيزيائية للفات الملف ( Windings ) .

ولقد أثبتت التجارب العملية أن نسبة القوة الدافعة الكهربائية ( e m f ) المعاكسة إلى معدل التغير في التيار ثابتة لتركيبة معينة من اللفات وتسمى هذه النسبة بالمحاثة ( Inductance L ) وتقاس بوحدة الهنري ( Henry H ) .

$$L = \frac{|emf|}{di/dt} \qquad (٦-٩)$$

الطاقة المختزنة في المجال المغناطيسي :

$$E_i = \frac{1}{2} L I^2 \qquad (٦-١٠)$$

حيث :

L : المحاثة بالهنري ( H )

I : التيار النهائي الثابت بالأمبير

وللملف اللولبي فإن :

$$L = \mu_0 n^2 \ell A \qquad (٦-١١)$$

حيث :

n : عدد اللفات

$\mu_0$ : النفاذية ( Permeability ) للفراغ

( $\mu_0 = 1.26 \times 10^{-6}$ H / m )

$\ell$ : طول اللفات.

أما العلاقة بين التيار والمجال المغناطيسي B فهي :

$$B = \mu_0 i n \qquad (٦-١٢)$$

الفرق الرئيس بين المكثف والمحث أنه في حالة المكثف ، فإن الطاقة المختزنة ( شحنة المكثف ) تبقى لفترة من الزمن بعد فصل المكثف عن مصدر الجهد الكهربائي، في حين أن الطاقة المختزنة في حالة المحث تستعاد بكاملها

( تغذى للدائرة الكهربائية ) عند فتـح الدائرة ، حيث يتلاشى المجال المغناطيسي مباشرة .

**مـثـال :**

ما هو مقدار الطاقة المختزنة في ملف لولبـي عـدد لفاتـه ٥٠ ويمر بـه تيـار مقداره ١٠ أمبير إذا كان طول هذا الملف ١٠ سم ومساحة مقطعه ٢ سم$^{٢}$ .

$L = \mu_0 n^2 \ell A$

$L = 1.26 \times 10^{-12} \times (50)^2 \times 0.1 \times 2 - 10^{-4}$

$L = 6.3 \times 10^{-8}$ H

$E_i = \frac{1}{2} L I^2$

$E_i = \frac{1}{2} \times 6.38 \times 10^{-8} \times (10)^2 = 3.15 \times 10^{-6}$ J

# ٦ ـ ٥

# تخزين الطاقة الحرارية

يستخدم نظام تخزين الطاقة الحرارية ثلاثة أشكال للطاقة الحرارية . وهي الطاقة الحرارية المحسوسة ( Sensible-heat ) والطاقة الحرارية الكامنة ( Latent-heat ) والحرارة شبه الكامنة ( Quasi-Latent heat ) وهذا النوع الأخير ليس شكلاً نقياً للطاقة الحرارية إذ انه يتضمن بعض التفاعلات الكيميائية .

في أنظمة تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة ، يتم تخزين الحرارة برفع درجة حرارة المادة الصلبة أو السائلة. فإذا كانت الحرارة النوعية ثابتة فإن الطاقة الحرارية المخزنة في النظام تتناسب خطياً مع الارتفاع في درجة الحرارة للمادة .

والمشكلة الرئيسة التي تواجه استخدام نظام تخزين الحرارة المحسوسة عند درجات حرارة مرتفعة هي ارتفاع تكاليف جهاز التخزين، الذي يكون عادة عبارة عن حاوية فولاذية مضغوطة أو فجوة ضخمة تحت الأرض .

تُخزن الطاقة الحرارية الكامنة عند ثبات درجة الحرارة، حيث تتغير حالة ( طور ) المادة ويكون هذا التغيير عادة من حالة الصلابة إلى الحالة السائلة، ويصاحب التغيير اكتساب ( شحن ) أو فقدان ( تفريغ ) كميات كبيرة من الطاقة الحرارية . وتمتاز أنظمة تخزين الطاقة الحرارية الكامنة بأن لها كثافة تخزين أعلى بكثير من تلك التي لأنظمة تخزين الطاقة الحرارية المحسوسة، وذلك لكون الحرارة الكامنة لتغير الحالة ( Latent heat of phase change ) مرتفعة للمادة المستخدمة في نظام التخزين ، وعلى سبيل المثال فإن الحرارة الكامنة لانصهار الماء ( الثلج ) تساوي ٣٣٤٩٠٠ جول / كغم والحرارة الكامنة لتبخره تساوي ٢٢٦٠٠٠٠ جول / كغم ، وتكون الحرارة الكامنة لتغير الحالة دائماً أعلى من

السعة الحرارية للمادة مما يجعل نظام تخزين الحرارة الكامنة أكثر فعالية من نظام تخزين الحرارة المحسوسة .

هناك مجموعة من المواد يطلق عليها اسم الهايدرات ( Hydrates ) تمتاز بارتفاع الحرارة الكامنة لتغير حالتها بالإضافة إلى انخفاض درجات حرارة انصهارها ، وبعض هذه المواد مبين في الجدول ( ٦ ـ ٣ ) .

في أنظمة تخزين الحرارة شبه الكامنة فإن الطاقة الحرارية يتم تحويلها إلى طاقة كيميائية في تفاعل إرجاعي ماص ( Reversible endothermic ) للحرارة يحدث عند درجة حرارة ثابتة. أما العملية العكسية فتتم بتغيير تركيز أو ضغط المتفاعلات أو بتغيير درجة الحرارة فقط أو بتغيير درجة الحرارة مع الضغط والتركيز . وفي حالة تغيير درجة حرارة المتفاعلات فقط فإن النظام يعمل كنظام تخزين للطاقة الحرارية المحسوسة .

وتتراوح أنظمة تخزين الطاقة الحرارية من الأنظمة البسيطة التي تستخدم الماء أو الهواء الذي يضخ عبر نظام التخزين، إلى الأنظمة المعقدة التي تستخدم فيها التفاعلات الكيميائية الماصة للحرارة على درجة حرارة ثابتة لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كيميائية .

هناك عاملان هامان يؤثران في تصميم نظام تخزين الطاقة الحرارية هما :

١ ــ معدل فقدان الحرارة الذي يعتمد على المساحة السطحية لنظام التخزين وفعالية العازل الحراري المستخدم حول النظام .

| Hydrate | Melting Point (°C) | Heat of Fusion (kJ/kg) | Specific Heat (kJ/kg °C) Solid | Specific Heat (kJ/kg °C) Liquid | Density (g/cm³) |
|---|---|---|---|---|---|
| $Al_2(SO_4)_3 12H_2O$ | 88 | 260 | 0.46 | 1.03 | 1.65 |
| $NaC_2H_3O_2 3H_2O$ | 58 | 264 | 0.60 | 1.00 | 1.30 |
| $LiNO_3 3H_2O$ | 30 | 306 | 0.58 | 0.94 | 1.44 |
| $Na_2SO_4 10H_2O$ | 18 | 186 | 0.54 | 1.00 | 1.51 |
| $1(Na_2SO_4 10H_2O) + 1.5(NH_4Cl)$ | 11 | 162 | 0.41 | 0.77 | 1.48 |

الجدول ( ٦ ـ ٣ )
خصائص بعض الهايدرات

٢ ــ كثافة الطاقة المخزنة. وهي الطاقة المخزنة لكل وحدة حجم وتقاس بوحدات جول / متر مكعب .

وبشكل عام فإن نظام تخزين الطاقة الحرارية ذو السعة الكبيرة يمتاز بأن نسبه ( المساحة السطحية / الحجم ) له تكون أقل ما يمكن .

ويمكن تقسيم أنظمة تخزين الطاقة الحرارية إلى :

١ ــ أنظمة ذات درجات حرارة منخفضة تعمل تحت درجة حرارة ١٥٠ س° وتخزن فيها الطاقة الحرارية المحسوسة في الماء أو الصخور أو الطاقة الحرارية الكامنة في الثلج أو بعض أنواع الأملاح مثل ملح جلوبر ( Glouber's sault ) ( $Na_2SO_4.10H_2O$ ) أو الشمع البرافيني أو الأحماض الدهنية. وتستعمل هذه الأنظمة أحياناً لتزويد البيوت بالحرارة في الشتاء للتدفئة .

٢ ــ الأنظمة ذات درجات الحرارة المتوسطة والعالية. تستعمل هذه الأنظمة بكثرة في تدفئة البيوت والصناعة ويتم فيها خزن الحرارة بتسخين الصخور أو الطوب أو الحديد أو السيراميك .

إن هذه الأنظمة تعتبر ذات تكاليف عالية بالإضافة إلى صعوبات تشغيلها ولذلك فهي لا تحظى بالاهتمام الكثير .

**مثال :**

ما هو حجم الحاوية اللازم لتخزين ٦٥ ميغاواط ــ ساعة من الطاقة الحرارية المحسوسة في بخار الماء المشبع عند درجة حرارة ٢٠٠° س إذا كانت قيمة الانثالبي للبخار عند هذه الدرجة هي ٢٧٩,٣ كيلوجول / كغم وحجمه النوعي هو ٠,١٢٧ م$^{3}$ / كغم .

كمية البخار اللازمة :

$$\text{Quantity of steam} = \frac{65 \times 10^{6} \times 60 \times 60}{279.3 \times 10^{3}}$$

$$= 8.3781 \times 10^{5}\ \text{kg}$$

الحجم اللازم :

$$V = \frac{0.127 \times 3.61 \times 65 \times 10^9}{279.3 \times 10^3}$$

$$= 1.064 \times 10^5 \text{ m}^3$$

وهـذا الحجم يكـافىء حجم خـزان اسطـواني قطـرة ٦٠ متـراً وارتفـاعـه ٤٠ متـراً ، وإذا أخذت الفـواقد بعين الاعتبـار فإن هـذا يعني أن الحجم المطلوب يكون أكبر من الحجم المحسوب .

**مـثـال :**

احسـب مقـدار الطـاقـة المخـزنـة لكـل وحـدة كتلـة فـي حجـم مـن $Na_2SO_4\,10H_2O$ مقـداره ٣ م$^3$ إذا كان مدى تغيـر درجـة الحـرارة هـو من ١٥° ــ ٥٠° س .

$$Q = C_{solid}\, m\, (T_{fusion} - T_{low}) + L_{fusion}\, m + C_{liquid}\, m\, (T_{high} - T_{fusion})$$

$$m = p^V = 1.51 \times 3 \times (10^2)^3 = 4.53 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$Q = [\, 0.54 \times (18 - 15) + 186 + 1.0 \times (50 - 18)\,] \times 10^3 \times (4.53 \times 10^3)$$

$$Q = 994.9 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\frac{Q}{m} = 219.6 \times 10^3 \text{ J / kg}$$

● ● ●

# الفصـل السابـع

# ترشيد استهلاك الطاقة

# ٧ ـ ١

# فوائد وأهمية ترشيد استهلاك الطاقة

هنـاك فوائـد عديـدة يمكن أن نجنيها من بـرامـج ترشيـد استهلاك الطـاقة يمكن تلخيصها بأربعة فوائد هامة :

١ ــ حفظ وترشيد مصدر هام وقيم: تشير الدراسات والبحوث ــ وكذلك الإجـراءات العملية التي اتخـذت في عدد من البلـدان ــ إلى أنه بـالإمكان توفير كميات كبيرة من الطاقة بتطبيق برامـج ترشيد الاستهلاك دون التـأثير على مستوى المعيشة لأفراد المجتمـع .

٢ ــ كسب المزيد من الوقت وإتاحة الفرصة لتطوير مصادر بديلة للطاقة: تشير دراسات الخبراء إلى أن الإنسان بحاجة إلى فترة زمنية تتراوح ما بين ١٠ ــ ٢٥ سنة لتطويـر مصادر بـديلة وفعـالة للطـاقة خصـوصاً في مجـال الانشطار النووي، ولا شك بأن تـرشيد استهـلاك وقود المستحـاثات ( الفحم والبتـرول والغاز ) التي هي المصـادر الرئيسـة للطاقـة في الوقت الحـاضر يعطى المزيد من الوقت لتطوير تلك المصادر البديلة .

٣ ــ تقليل تلوث البيئة: كما رأينا سابقاً فإن واحدة من المشاكل الرئيسة التي تواجه المصادر البديلـة والمصادر الحـالية للطـاقة على السـواء هي مشكلة التلـوث حيث ان المصدر الـوحيد الخـالي من التلوث تقـريبـاً هـو الطـاقـة الشمسية،ولا شك بأن استغلال هذا المصدر والتقليل من استعمال المصادر الأخرى يساهم في التقليل من حجم مشكلة التلوث .

٤ ــ التقليل من اعتماد البلدان المستوردة للطاقة على وارداتها من الدول الأخـرى

المصدرة لها، فترشيد استهلاك الطاقة يساهم في توفير مبالغ طائلة تدفعها الدول المستوردة للطاقة ثمناً لمستورداتها .

هناك طريقتان أساسيتان يمكن اتباعهما لحفظ وترشيد استهلاك الطاقة ، وهما :

١ ــ اتباع سياسة ( شد الحزام ) وذلك بالاستغناء عن بعض المتطلبات غير الضرورية .

٢ ــ استعمال الطاقة بفعالية أكبر ( تقليل الفواقد ) مع المحافظة على نفس المعدل من الاستهلاك مع وجود القناعة بهذا الاستهلاك .

# ٧ ـ ٢
# حفظ الطاقة وتأثير العامل الشخصي

يعتمد نجاح أي مشروع أو برنامـج لحفظ الطاقة على تعاون أفراد المجتمـع في هذا المجال والذين هم الهدف الأول والأخير لمثل هذا البرنامـج .

من دراستنا السابقة عرفنا أن أحد العوامل الرئيسة التي تزيد من استهـلاك الطاقة هي زيادة معدل استهـلاك الفرد من الطاقة. وهنـاك عامـل آخر يـرتبط بهذا العامل وهو الزيادة في الخسائر ( الفواقد ) في عمليات تحويل الطاقة .

مما لا شك فيه أن الزيادة في معدل استهلاك الفرد من الطـاقة يعـود بشكل أساسي إلى التغير المستمر في أسلوب ومستوى معيشة الأفـراد حيث ان التحول من اعتماد الإنسان على عضلاته إلى الاعتماد على الآلات في ازدياد مستمر .

ولعل التحول إلى استعمـال الطاقـة الكهربـائية والاعتمـاد عليها في مختلف المتطلبات داخل المنـزل يتسبب في زيادة ملحـوظه في استهـلاك العائلـة من هذه الطاقة.والسؤال الذي يطرح نفسه كيف يمكن الحد من تزايد استهلاك الطاقـة على المستوى الفردي ؟

المقترحات التالية تقدم بعض الحلول الممكنة على المستوى الفردي :

١ ــ زيادة أسعار الاستهلاك الفائض من الطاقة ــ الكهربائيـة خصوصاً ــ أو فرض ضرائب على هذه الزيادة .

٢ ــ تحديد عدد السيارات التي تقتنيها العائلة .

٣ ــ تحديد عدد الأطفال في الأسرة ( تنظيم النسل ) .

٤ ـ منـع استعمال الإضاءة الزائدة وإطفاء الغرف والأماكن الشاغرة .

٥ ـ استعمال المواصلات العامة ما أمكن ذلك .

٦ ـ عدم استعمال السيارات للمسافات القصيرة التي يمكن الوصول إليهـا على الأرجل .

٧ ـ التقليل من عدد الرحلات الترفيهية وتقصير مسافتها .

ولا شك بأن هنـاك فرصـاً أخرى عـديدة يمكن لـلأفراد من خـلالها تـرشيد استهلاك الطاقة ليـس هناك مجال لحصرها جميعاً .

# ٧ ـ ٣

# الطلب على الطاقة والتزود بها في المستقبل

للمساعدة في الحصول على صورة واضحة لأهمية حفظ الطاقة فإن ذلك يتم بدراسة متطلبات أو احتياجات الطاقة وطرق التزود بها في المستقبل .

ويمكن دراسة متطلبات الطاقة في المستقبل باستخدام معدلات النمو المتوقعة في الاستهلاك كما مر سابقاً .

إن التقديرات لمصادر الطاقة الرئيسة في المستقبل تشير إلى أن وقود المستحاثات ستبقى هي المصدر الأساسي للطاقة وستلعب الدور الرئيس في المستقبل المنظور .

فالنسب المئوية للطاقة المولدة من المحطات الكهرومائية والفحم الحجري والنفط من المتوقع أن تبقى ثابتة حتى منتصف التسعينات .

ومن المتوقع أن تقل نسبة الطاقة المولدة من الغاز الطبيعي خلال هذه الفترة وتزداد أهمية الطاقة النووية التي ينتظر أن تلعب دوراً رئيساً كمصدر للطاقة في المستقبل .

إن اتباع سياسة حفظ الطاقة وترشيد استهلاكها يمكن لها أن توفر نسباً من الطاقة في المستقبل ، ففي الولايات المتحدة ـ مثلاً ـ تشير الدراسات إلى أن اتباع إجراءات حفظ الطاقة على المدى القصير ( ١ ـ ٣ سنوات ) والمدى المتوسط ( ٤ ـ ٨ سنوات ) والمدى الطويل ( أكثر من ٨ سنوات ) ستوفر حوالى ٢٤ ٪ من استهلاك الطاقة عام ١٩٩٠م .

## ٧ ـ ٤

## ترشيد استهلاك الطاقة
## في قطاعات الاستهلاك المختلفة

### ٧ ـ ٤ ـ ١ ترشيد استهلاك الطاقة في القطاعين المنزلي والتجاري :

**١ ـ أنظمة البناء :**

( أ ) اختيار النوافذ بحيث تواجه الأشعة الشمسية لتوفير الإضاءة والحرارة خصوصاً في الشتاء .

(ب) العزل الحراري كعزل الشبابيك والأبواب وأنابيب التدفئة والتبريد ... وعزل الأرضيات والجدران والسقوف .

**٢ ـ العناية بأنظمة التكييف والتدفئة :**

( أ ) عزل أنابيب التدفئة .

(ب) اقتناء منظم لدرجة الحرارة (Thermostat) وضبطه عند قيم محددة ( في الليل يقترح ١٥°س وفي النهار ١٨°س ) .

( ج ) صيانة نظام التدفئة بشكل دوري ( مرة واحدة سنوياً ) .

( د ) التأكد من جودة وفعالية فتيل المدفأة للحصول على احتراق كامل .

**٣ ـ العناية بأنظمة تسخين المياه :**

( أ ) اقتناء أنظمة تسخين مياه شمسية .

(ب) اقتناء أنظمة تسخين معزولة حرارياً بشكل جيد .

( ج ) عدم تسخين المياه لأكثر من ٥٠° س لمختلف الاستعمالات المنزلية .

٤ ــ العناية بانظمة التبريد :

( أ ) التأكد من ضبط درجة الحرارة عند قيمة معينة بواسطة المنظم .

(ب) عزل مجاري الهواء .

( ج ) اقتناء وحدات تبريد صغيرة إذا كان المقصود تكييف أماكن جـزئية فقط .

( د ) ضبط سرعة المروحة على السرعة القصوى إلّا في الأيام الرطبة .

(هـ) تنظيف مرشـح الهواء .

( و ) استخدام مراوح إضافية في التبريد لنشر الهواء بشكـل أفضل في الحيز المكيف .

٥ ــ انظمـة الإنـارة :

( أ ) إطفاء أنوار الغرف والأماكن الشاغرة .

(ب) استخدام مصابيـح ذات قدرات عاليـة بدلًا من مجمـوعة مصـابيـح ذات قدرات منخفضة .

( ج ) استخدام مفاتيـح إنارة ذات مستويات مختلفة من الشدّة .

( د ) المحافظة على نظافة المصابيـح السطحية .

(هـ) استخـدام مصـابيـح الفلـورسنت لأنهـا ذات شـدة إضـاءة أعلى واستهلاك أقل .

٦ ــ أسس اقتناء السيارات :

( أ ) شراء السيارات خفيفة الوزن الاقتصادية في استهلاك الوقود .

(ب) عدم المبالغة في استخدام أنظمة التكييف والتبريد في السيارة .

( ج ) صيانة محرك السيارة بشكل دوري .

( د ) المحافظة على ضغط الهواء في عجلات السيارة عند حـد معين لأن انخفاض الضغط يؤدي إلى زيادة استهلاك الوقود .

(هـ) استخدام إطارات شعاعية لتوفير طاقة تصل إلى ٥ ٪ .

( و )   التخلص من الأوزان الزائدة في السيارة .

٧ ــ **أنظمـة تبريد الطعام والطهي :**

( أ )   عدم المبالغة في فتـح أبواب الثلاجات في المنازل والمتاجر .

(ب)   حفظ الطعام عند حرارة ٣° ــ ٥° س ونظام التجميد عند ــ ١٨°س .

( ج )   إزالة الصقيـع عن جدران المجمد بانتظام .

( د )   الالتزام بإشارات كتب الطهي بخصوص فترة نضـج الطعام .

(هـ)   استخـدام أدوات مطبـخ نظيفـة من الأسفـل ( خـاليـة من طبقـة الكربون ) .

( و )   المحافظة على الطباخات نظيفـة والمحافظـة على اللهب الأزرق لهذه الطباخات .

وهناك أيضاً نقاط إرشادية أخرى عديـدة تتعلق باستخـدام أنظمة الغسيـل والخياطة وغيرها من أنظمة استهلاك الطاقة في المنازل والمتاجر .

## ٧ ــ ٤ ــ ٢   ترشيد استهلاك الطاقة في القطاع الصناعي :

يستهلك هذا القطاع نسبةً عالية من مجموع الطاقة المستهلكة، ولا شـك بأن ترشيد استهلاك الطاقة واستخدامهـا بالطـرق الفعالـة والمناسبـة في هذا القطـاع يؤدي إلى تخفيض تكاليف الانتاج وتـوفير مبـالـغ طائلـة على الدولـة والمؤسسات الخاصة والأفراد .

يحتاج ترشيد استهلاك الطـاقة في هـذا القطاع إلى دراسـة شاملـة ودقيقة لحفظ الطاقة، تأخذ بعين الاعتبار عوامل هامـة ورئيسة كتصميم المصنـع وأنمـاط التشغيل وصيانة الأجهزة والمعدات وتوافرأجهزة التحكم والكـوادر الفنية المـدربة في مجـال حفظ الطاقـة في المصنـع والجدوى الاقتصـادية لاستغـلال مثـل هـذه الفرص .

يمكن تقسيم طرق حفظ الطاقة في الصناعة إلى قسمين رئيسين :

١ ــ تنظيم تشغيل وصيانة الأجهزة والمعـدات : ومن أهم الأمثلة على ذلـك العزل الحراري لأنـابيب البخار والمـاء الساخن وصيـانة نقـاط تسرب

الهـواء في نظـام انضغـاط الهـواء وتسـرب البخـار من الصمـامـات والوصلات ،
وقياس استهلاك البخار والتحكم الأتوماتيكي بدرجـات الحرارة للبخـار وكذلك يجب دراسة ومتابعة كفاءة مختلف الأجهزة والعمليات والأنظمة في المصنـع .

٢ ـ استغلال الطاقة الضائعة : وهي الطاقـة الحراريـة الخارجـة من نظام معين بدرجة حـرارة مرتفعـة وأعلى بكثير من درجـة حرارة الجـو مثل الحرارة الضائعة من الغازات العـادمة والمـواد الساخنـة المنتجة في المصنـع خصـوصاً السوائل. ويمكن استغـلال الحرارة الضـائعة في السوائل والغازات ذات درجات الحرارة العالية وذلك بتـركيب مبادلات حرارية ( Heat-Exchanger ) ومضخات حرارية (Heat pumps ) .

ومن الأمثلة على ذلك استغلال حرارة الغازات العادمة الخارجة من المراجـل البخارية لتسخين مياه التغذية بواسطة مبادلات حرارية فعالة .

ويمكن للحكومة أن تتخـذ بعض الإجراءات لتنظيم استهـلاك الطاقـة في هذا القطاع ، من أهمها

١ ـ زيادة أسعار الطاقة المستهلكة بشكل زائد أو فائض .

٢ ـ فرض غرامات على استهلاك الطاقة الكهربائية من قبل هذه المصانـع في فترات الذروة أو الحمل الأقصى ( Peak-load )

٣ ـ منـع استعمال مصادر الطاقة ذات التكاليف المرتفعة لإنتاج الكهـرباء كالغاز الطبيعي مثلاً .

٤ ـ منـع أي توسـع صناعي غير ضروري .

٥ ـ تشجيـع استعمال المواد البديلة التي يتطلب إنتاجها طاقة وتكلفـة أقل مثل العبوات المصنوعة من بعض أنواع الحديد بدلاً من الألمنيوم .

٦ ـ منـع استعمال بعض المنتجات التي يتم التخلص منهـا بعد استهـلاك محتوياتها مثل بعض زجاجات المشروبات التي يتم التخلص منهـا بعد استهلاك المشروبات ولا تعاد تعبئتها .

٧ ـ تشجيـع المنتوجات ذات الجودة الأعلى والعمر الأفضل .

٨ ــ تشجيع إعادة بعض المواد المستهلكة مثل حديد السيارات التالفة .

في الأردن نما استهلاك الطاقة في القطاع الصناعي في السنوات الأخيرة بشكل سريع حيث كان هذا الاستهلاك يشكل حوالى ٢٠ ٪ من مجموع استهلاك الطاقة الكلي في الأردن عام ١٩٨٠م بينما وصل إلى حوالى ٢٩ ٪ من مجموع الاستهلاك عام ١٩٨٧م .

## ٧ ـ ٤ ـ ٣ ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع النقل :

تعد عملية ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع النقل مهمة صعبة نوعاً ما إذ انها تتطلب إحداث بعض التغييرات في عادات وأذواق وطموحات قطاع كبير من أفراد المجتمع .

ومن الإجراءات الهامة التي يمكن لها أن تؤدي إلى توفير كبير في الطاقة في هذا القطاع ما يلي :

**١ ــ على المدى القصير : ( Short-term measures )**

( أ ) استخدام السيارات ذات السعة الكبيرة .

(ب) استخدام السرعات الاقتصادية لوسائل النقل المختلفة .

( ج ) استعمال السيارات الخصوصية الصغيرة والخفيفة .

( د ) التحول إلى استعمال وسائط النقل العام بدلاً من السيارات الخصوصية قدر الإمكان .

(هـ) التخفيف من استعمال وسائل النقل الخاصة للاغراض غير الضرورية كالنزهات البعيدة والطويلة والزيارات الكثيرة .

( و ) استعمال وسائل تخفيف استهلاك الوقود في السيارات مثل بعض أنواع الإطارات ذات معامل الاحتكاك المنخفض .

**٢ ــ على المدى المتوسط والمدى الطويل :**
**( Midterm & longterm measures )**

( أ ) تنظيم مسارات وتقاطعات الطرق والاشارات الضوئية بحيث يؤدي هذا التنظيم إلى تسهيل حركة السير إلى أقصى حد ممكن وتقصير المسافات لوسائط النقل العامة بشكل خاص.

(ب) تطوير آلات ذات كفاءات أعلى .

( ج ) تطوير أنظمة وشبكات النقل العام ومتابعة هذا التطوير بشكل مستمر .

( د ) تغريم اقتناء السيارات الزائدة وتشجيع استعمال وسائط النقل العام ذات الكلفة الأقل .

(هـ) استعمال وسائط النقل العامة التي تستخدم مصادر الوقود الرخيصة كالديزل والفحم الحجري .

بالنسبة للأردن فإن قطاع النقل يستأثر بأعلى نسبة استهلاك للطاقة، إذ بلغت هذه النسبة ٤٨ ٪ عام ١٩٨٠م من مجموع استهلاك الطاقة الكلي في الأردن وقد تراجعت هذه النسبة إلى حوالى ٣٩ ٪ عام ١٩٨٧م .

● ● ●

# الفصل الثامن

# التلوث البيئي الناتج عن تحويل الطاقة

# ٨ ـــ ١
# تغيــرات المنــاخ

يُسمى المناخ لمنطقة جغرافية صغيرة تتراوح مساحتها بين بضـع مئات من الأمتار المربعـة إلى بضـع مئات الكيلـومترات المـربعة بمنـاخ المنطقة الصغيـرة ( المحدودة ) أو المناخ المحلي ( Micro climate ) .

إن مثل هذه المنطقة تتأثر بالمناخ العام بالإضافة إلى تأثرها بشكـل مباشـر بعوامل محلية صرفة ليس لها علاقة بالمناخ العام وهذه العـوامل هي التي سنـركز عليها في هذه الدراسة .

## ٨ ـ ١ ـ١ منــاخ المـدن

هناك اختلافات واضحة بين مناخ المدن ومنـاخ الريف ، وهـذه الاختلافـات معـروفة منـذ سنين عديـدة ولكن أسبابهـا بدأت تتضـح وتُفهم بشكـل أوسـع في الفترة الأخيرة . فالمدينة عبارة عن منطقة جغرافية ذات كثافة سكانية عالية، ويكون تركيز المخلفات أو النواتـج الثانوية المصاحبة لنشاطات الإنسان المختلفة في هذه المنطقة أكبر منها في المناطق الريفية. ومن الأمثلـة على هذه النشـاطات المؤذيـة للبيئة بشكل كبير الإنتاج الثقيل والتكريـر ومحطات الطـاقة المـركزيـة ... وكنتيجة لـذلك فـإن هواء المنـاطق الحضريـة ( Urban areas ) يكون بشكـل عام مُحمّـلاً بالضباب والـدخان والملوثات الغازية .

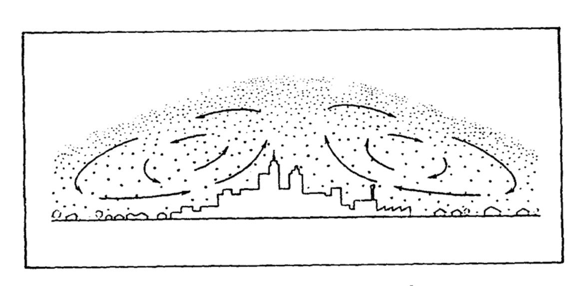
ولا يتوقف تأثير هذه الملوثات على زيـادة تأثيـر البيت الزجـاجي ( الأخضر Green house effect ) بل إنها تقوم بامتصاص الحرارة أيضاً، وهذا الامتصـاص يعمل على تثبيت ( Stable ) الكتل الهوائية فـوق هذه المُـدن مما يقلـل من انتشار وتبعثر الملوثات في الجو ويساهم في زيادة تركيزها .

إن المدينة عبارة عن كتل متراصّة من الأبنية، ومواد هذه الأبنية من الحجارة والاسمنت المسلح التي تمتص الحرارة أبطأ بثلاث مرات من التربة العادية والمناطق النباتية الخضراء، ولكنها توصل الحرارة أسرع منها بثلاث مرات ، لذا فإنها تخـزن الطاقة الحرارية بكميات أكبر عند درجات حرارة أقل ، وفي الليل فإن هذه البنايات تشـع الحرارة للجو أبطأ بثلاث مرات من التربة العادية، ولهذا فإن جو المـدن يكون عادة أكثر دفـأً من جو المنـاطق الريفيـة أو المناطق الـزراعية الخضـراء المحيطة بـالمدن . الشكـل ( ٨ ـ ١ ) يبين جـو المـدينـة المغلف بقبـة من البخار الملـوث . ( Dust dome )

نتيجة للعوامل المحلية ، ليس هناك من حلٍ شـافٍ لمشكلة الجـو الملوث في المدن ، إلّا أنه بالإمكان التخفيف من حجم المشكلة بواسطة اتخاذ بعض التـدابير مثل التقليل من الأجهزة المولدة للحرارة كالسيارات والمصانـع وكثافـة السكان ... وكذلك الحد من عدد البنايات العالية المتقاربة وزيـادة المناطق النبـاتية الخضـراء داخل المدن واستعمال مواد متعددة ومختلفة في البناء .

## ٨ ـ ١ ـ ٢ الأمطار الحامضية( Acid rain )

عند انطلاق أكاسيد النيتروجين والكبريت من محطـات التوليـد الكبيرة فـإن هذه الأكاسيد تتحول بسرعة إلى سلفات ونيترات ( Sulfate & Nitrates ) ومن ثم



الشكل ( ٨ ـ ١ )
قبة الغبار الملوثة فوق المدنية

تتفاعل مـع بخار الماء ( الرطوبة ) في الجو لتكـون حامضي الكبـريتيك والنيتـريك ( Sulfric & Nitric acids ) التي تسقط على شكل مطر يعـرف بالمطـر الحامضي خصوصاً في المنـاطق المجاورة لمحطـات حرق الفحم الكبيـرة . وفي عام ١٩٥٠م لوحظ أن هذه الأمطار الحامضية تمتد إلى مناطق أخرى بعيـدة عن مناطق التلـوث الجوي كبعض المناطق الاسكندنافية ( Scandinavia ) حيث وجد من خلال بعض القيـاسات لهـذه الأمطار بين عـامي ١٩٥٧ ــ ١٩٧٠م في هذه المنـاطق أن نسبة الحموضة مرتفعة ، أي ان قيمـة (P H ) منخفضة. وتعرف القيمة ( P H ) بـأنها سالب اللوغاريتم لتركيز ايون الهيدروجين معبراً عنه بوحـدات مول / لتـر Mole ) ( per liter وللمـاء المتعادل تكـون قيمة ( P H ) تسـاوي سبعـة (٧) ولـلأمطـار الإعتيادية غيـر الملوثـة تكون هـذه النسبة حـوالى ٥,٧ بسبب وجود ثـاني أكسيد الكربون في الجو .

يُمثل التغير في قيمة ( P H ) من ٥ إلى ٤ زيادة في تركيز ايون الهيدروجين بمقدار عشرة (١٠) ، وأكثر الأمطار حمـوضة تلـك التي هطلت في اسكوتلنـدا عام ١٩٧٤م ، حيث وصلت قيمة ( P H ) لهذه الأمطار إلى ٢,٧ .

للأمطار الحامضية أثـار ضارة على البيئة من أهمها :

١ ــ التقليل من غلة النباتات والغابات والحد من نموها .
٢ ــ التقليل من تكاثر الحياة البحرية والأسماك .
٣ ــ تآكل وإتلاف سطوح المعادن المكشوفة .
٤ ــ الحد من نشاطات الكائنات العضوية الدقيقة .
٥ ــ تلاشي المادة الغذائية من التربة والأنظمة البيئية المائية .

وقد لوحظ أن الأسماك قد اختفت من البحيرات التي تقل فيها قيمة ( P H ) عن ٤,٦ .

# ٨ ـ ٢
# تلـوث الهـواء

## ٨ ـ ٢ ـ ١ الملـوثـات الأوليـة للهـواء الجـوي :
## ( Primary air pollutants )

إن المـواد الأولية المصـاحبة للهـواء الملـوث هي : أول أكسيـد الكـربـون ( C O ) ، والهيدروكربـونات ( H C ) ، واكـاسيد الكبـريت ( $S\ O_X$ ) وأكاسيـد النيتـروجين ( $N\ O_X$ ) ، والدقـائق ( الهبـاب ) الصلبـة العـالقـة ( Particulate matter ) .

١ ــ أول اكسيد الكربون : ( Carbon Monoxide C O )

لا يعتبـر أول اكسيد الكـربون مؤذياً للنبـاتـات ــ بشكـل خـاص ــ إلاّ إذا تعرضت النباتات لهذا الغـاز لفترة طـويلة وبتـركيز عالٍ . ولكنه مضـر جداً وسـام للإنسان والحيـوان في حالـة تَنفسه، حيث ان قـابليَّة الـدم لامتصاص أول أكسيـد الكـربون اكبر بحوالى ٢١٠ مرات من قابليتـه لامتصاص الأكسجين ممـا يزيـد من خطورته على الإنسان بشكل خاص .

٢ ــ الهيدروكربونات غير المحترقة : ( H C )

وتشمل الهيدروكربونات مجموعة واسعة جداً من المواد الكيميائية ( الوقود ) لها تركيب جزيئي مكون فقط من الكربون والهيدروجين .

اكثر من نصف الهيدروكربونات الموجودة في الجو هي من الميثان ($CH_4$)، وهذه المجموعة لا تعتبر خطرة على الصحة عمـوماً ، ولكن المجمـوعة الأخـرى من الهيدروكربونات ــ غير الميثان ــ مثـل الالدهـايدات ( Aldehydes ) ، والبنـزين

( Benzene ) ، والكيتون ( Ketone ) ، والإيثيلين ( Ethylene ) .. تمثل خطراً على الصحة كأثرها في إحداث تهيج الجلد ( Skin irritation ) والعين وخطر السرطان ( Cancer ) .

### ٣ ـــ الدقائق الصلبة العالقة : ( Suspended particulates )

كثير من هذه الدقائق التي تنبعث من محطات القوى الكبرى والعمليات الصناعية تعود للأرض كغبار متساقط . ودقائق الغبار الساقط هي تلك الدقائق التي لها أقطار أكبر من ١٠ ميكرومتر ( $10\ \mu m$ ) وخطر هذه الدقائق العالقة يعتمد على طبيعتها الكيميائية وتؤثر بشكل خاص على الرئتين والجهاز التنفسي للإنسان .

### ٤ ـــ أكاسيد الكبريت :( Oxides of Sulfur )

تنبعث غازات ثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) وثلاثي أكسيد الكبريت ( $SO_3$ ) من أنظمة حرق وقود المستحاثات بنسبة ١ / ٣٠ ويمكن لهذين الغازين التحوّل إلى أحماض الكبريتيك ( Sulfuric acids ) بوجود بخار الماء في الجو . ولغاز ثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) وحامض الكبريتيك تأثيرات خطرة على الصحة تتمثل في تهيج وانقباض الشعيبات القصبية في الرئتين .

### ٥ ـــ أكاسيد النيتروجين : ( Oxides of Nitrogen )

تنبعث غازات أكسيد النيتريك ( $NO$ ) وثاني أكسيد النيتروجين ( $NO_2$ ) مع عدة أكاسيد نيتروجينية أخرى من عمليات الاحتراق ذات درجات الحرارة المرتفعة .

يعتبر ثاني أكسيد النيتروجين ( $NO_2$ ) ذو تأثير خطر جداً على الصحة ويمكن أن يكون له تأثير قاتل إذا زاد تركيزه عن حد معين .

كما أن كلا الغازين ( $NO$ ) و ( $NO_2$ ) يؤثران على الحياة النباتية ويؤديان إلى إبطاء معدل نموها بالإضافة إلى تأثيرهما الضار على بعض المواد مثل إتلاف ألياف القطن والنايلون وتغيير ( إحداث تلاش ) في لون الصبغات ( Fading of dyes ) .

كما أن التعرض لغاز ( $NO_2$ ) لفترة طويلة بتركيز حوالى ( $150\ \mu g/m^3$ ) يؤدي إلى انقباض ( تشنّج ) وتورّم الشعيبات القصبية وازدياد احتمال حدوث

مـرض مزمن للجهاز التنفسي. ويعدّ خطـر أكاسيـد النيتروجين في إنتـاج وتكوين الملوثات الثانوية أكبر من خطرها كملوثات أولية، وهذه الملوثات الثـانويـة عبارة عن مجموعة من المواد يطلق عليها اسم المؤكسدات ( Oxidants ) .

## ٨ ـ ٢ ـ ٢ تلوث الهواء الثانوي :( Secondary air pollution )

إن العـديد من الملـوثات الأوليـة تتفاعـل مـع بعضـها ومـع الشمس بتوافـر ظروف جوية معينة لتكون مُلوثات ثانوية ضـارة وسيئة كـالملوثـات الأولية وأحيـاناً أسوأ منها وأشد ضرراً .

### ١ ــ تأثير انقلاب درجة الحرارة : ( Temperature Inversion )

يبقى الهواء الملوث فوق المدن ( الأماكن الحضرية ) أحياناً لفترة طويلة في مكانه دون أن ينتشر أو يُخفف أو يبتعد عن المنطقـة . وأحد الأسبـاب الأساسيـة لوضـع كهذا ، ما يسمى بانقلاب درجة الحرارة ( Temperature Inversion ) .

تتناقص درجة حـرارة الجو بـانتظام مـع زيـادة الارتفاع عن سطـح الأرض ويعطى معدل انحدار درجة الحرارة الأديابتيكي مـع الارتفاع ( $Z$ ) بالمعادلة :

$$\text{Adiabatic lapse rate} = -\frac{dT}{dZ} \qquad (١ - ٨)$$

$$= \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma}\right)\left(\frac{g\,m}{R}\right)$$

حـيـث :

$\gamma$ : الأس الأيزونتروبـي للهواء ويساوي ١,٤١ للهواء الجاف .

M : الوزن الجزيئي للهواء ويساوي ٢٨,٩٧ للهواء الجاف .

وبتعويض هذه القيم بالمعادلة أعلاه نجد أن :

$$-\frac{dT}{dZ} = 0.0099 C^{o} / m \qquad (٢ - ٨)$$

أو ما يعادل $1 C^{\circ} / 100 m$ .

إن معدل الانحدار هذا ، له تأثير على ثبات حيز من الهواء ( الملوث ) فوق منطقة معينة، فإذا كان هذا المعدل أكبر من معدل الانحدار الأديابتيكي ، فإن هذا الحيز من الهواء سيكون محاطاً بهواء أبرد منه ومن ثم فإنه سيرتفع للأعلى ، وتسمى هذه الحالة بالجو غير المستقر، أو غير الثابت ( Unstable-atmosphere ) .

وهذا الوضع مرغوب به لأنه سيؤدي إلى ارتفاع الحيِّز الملوث من الهواء إلى الطبقات العليا من الجو واختلاطه مع حجوم أكبر من الهواء غير الملوث.

وفي حالة كون معدل الانحدار أقل من المعدل الأديابتيكي فإن حيِّز الهواء الملوث سيتجه للأسفل، ولا شك بأن هكذا وضع غير مرغوب فيه من وجهة نظر نَشر الملوثات ، ومن الممكن أن يكون لِمُعدل الانحدار إشارة معكوسة ( إشارة موجبة ) ، أي ان درجة الحرارة تزداد بازدياد الارتفاع، وهذا الوضع يسمى بانقلاب درجة الحرارة وهو وضع سيىء بالنسبة للتلوث لأنه يؤدي إلى ثبات واستقرار الحيِّز الملوث من الهواء وعدم حركته واختلاطه مع الهواء المحيط به (غير الملوث).

يحدث وضع انقلاب درجة الحرارة عادة في الليل حيث يبرد الهواء الملامس والقريب من سطح الأرض بسرعة أكبر من الهواء البعيد عن هذا السطح .

إن حدوث وضع انقلاب درجة الحرارة يؤدي إلى اتجاه الهواء الملوث للأسفل باتجاه الناس والبيوت ، وقد يؤدي ذلك إلى حالات وفاة إذا كان الهواء الملوث يحتوي على نسبة عالية من أكاسيد الكبريت .

**٢ ـــ التفاعلات الضوئية الكيميائية : ( Photochemical reactions )**

إن الملوثات الثانوية التي تشكل الخطر الأكبر على الصحة في المناطق الحضرية والمزدحمة بالسكان هي نتيجة لتفاعلات كيميائية متتابعة ومعقدة وغير مفهومة بشكل كامل حتى وقتنا الحاضر، وجميع هذه التفاعلات تنطلق بتأثير الأشعة الشمسية .

هناك مُقوّمان مهمان لهذه التفاعلات هما الأوزون ( Ozone ) والعديد من الهيدروكربونات الأخرى غير الميثان ، وبمجموعها تسمى المؤكسدات ـــ المؤكسد أي مادة يمكن لها أن تسبب حدوث تفاعل التأكسد ـــ

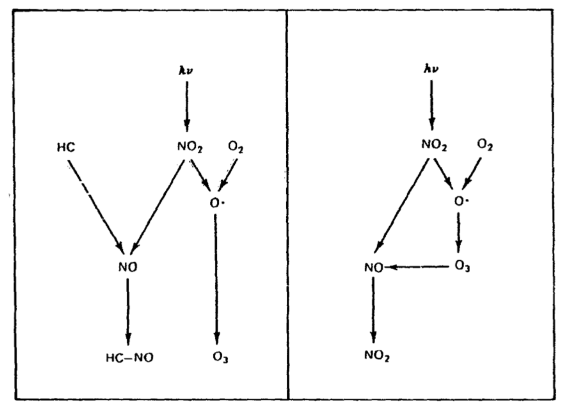
هناك العديد من المؤكسدات الهيدروكربونية ، وبما أن الأوزون يكون دائماً واحداً من المؤكسدات فإنه من الطبيعي ان يعبر عن مستويات ( تركيز ) هذه المؤكسدات بتحديد مستوى الأوزون .

يتم إنتاج الأوزون ( $O_3$ ) في طبقات الجو السفلى بواسطة تفاعل جزيئات الأكسجين مع ذرات الأكسجين المُحرَّرة من تفاعل ضوء الشمس مع ثاني أكسيد النيتروجين كالآتي :

$$NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O.$$

$$O_2 + O. \rightarrow O_3$$

وإذا لم يكن هناك ملوثات أخرى في الجو، فإن التفاعلات أعلاه يتم إبطالها ( Negated ) بواسطة إعادة الاتحاد بين الأوزون ( $O_3$ ) واكسيد النيتريك ( NO ) كما هو مبين في الشكل ( ٨ ـ ٢ ) .




الشكل ( ٨ ـ ٢ )
تسخين خفيف للجو بواسطة ( $NO_2$ )

الشكل ( ٨ ـ ٣ )
إنتاج مركبات نيتروجينية عضوية بواسطة اشعة الشمس

وتكـون الحصيلـة النهـائيـة للعمليـة مجـرد تسخين بسيط للجـو بـواسطـة امتصاص الفوتونات الضوئية، ولكن بوجود الهيدروكربونات كما هو مبين في الشكل (٨ ـ ٣ ) فـإن الأوزون المنتـج في الخطوة الأولى يبقى على حـاله ويتكـون مركب نيتروجيني عضوي ( H C-N O ) .

ويمكن إنتـاج المزيـد من الأوزون عن طريق اختـزال مركبـات لهـا الصيغـة ( H C O ) بواسطة مركب ( N O ) والذي ينتـج أيضاً مركب ( $NO_2$ ) .

إن العديد من النيترات العضوية (Organic Nitrates) في الجو الملوث تعتبر مؤكسدات قوية جداً وهذه المؤكسدات لها الصيغة التركيبية :

$$RC\overset{\overset{O}{\|}}{O}ONO2$$

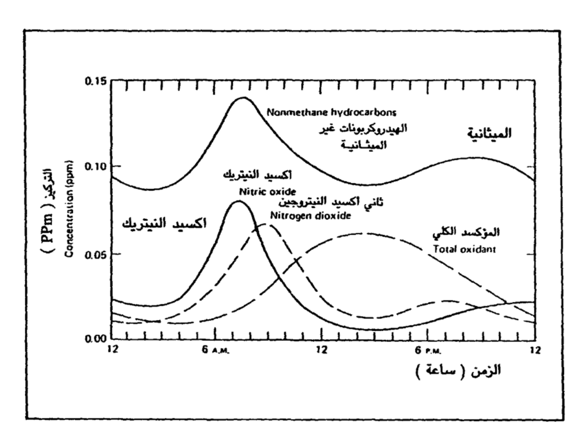
حيث ان ( R ) هي أحـد الجـذور الالكـانيـة ( Alkane roots ) ولكن على الأغلب فإن ( $R = CH_3$ ) . وتعتبر هذه المؤكسدات ذات تأثير مـؤذ حيث انها تتلف الأنسجة الجسدية للإنسان وتدمر الحياة النباتية . إن إنتاج هذه المؤكسدات الضـارة يرتبط ارتبـاطاً وثيقـاً بإنتـاج الملوثـات الأولية من أكـاسيـد النيتـروجين .( $NO_x$ )

الشكـل ( ٨ ـ ٤ ) يبيـن تنـامـي كـل مـن ( N O ) و ( $NO_2$ ) والهيدروكربونات غيـر الميثانيـة ( Non - methane hydrocarbons ) والمؤكسد مـع الزمن ( الوقت من اليوم ) في جو منطقـة حضريـة مكتظّة بـالسكان ووسـائط النقل والمصانـع ومحطات القوى ...

وكمـا نـلاحظ من الشكـل فـإن القيم ( N O ) و ( $NO_2$ ) العظمى تـرتبط بساعات الازدحام الصباحية والمسائية. ويبين الشكل أيضاً أن تكون المؤكسد يبدأ مباشرة بعد طلوع الشمس ويصل إلى ذروته عنـد الظهر ، ثم يبـدأ بالتنـاقص بعد ذلك طالما أن هناك ضوءاً نهارياً كافياً .

## ٨ ـ ٢ ـ ٣ التلوث داخل البيوت : ( Indoor pollution )

هنـاك أربـع ملوثـات رئيسة داخـل البيوت ، هي غـاز الـرادون ( Radon ) وأول أكسيد الكربون ( C O ) والدقائق العالقة كالغبار والمواد العضـوية . يعتبـر




**الشكل ( ٨ ـ ٤ )**
**العلاقة بين تركيز الغازات الملوثة والزمن**
**في جو منطقة حضرية ( $1PPm = 1.15mg / m^3$ )**

غاز الرادون ( $Rn^{222}$ ) غازاً خاملاً ينتج من الاضمحلال الإشعاعي لعنصر اليورانيوم ، أما الرادون كعنصر مشع ( Radio active ) فيكون باعثاً لجسيمات الفا ( α-emitter ) ، وهذا النظير له فترة نصف عمر تساوي ٣,٨ يوماً فقط .

ولكن نواتج اضمحلاله هي أيضاً مواد مشعة وتبعث جسيمات الفا ( α ) . وتقوم هذه المواد المشعة بالالتصاق بالدقائق العالقة والغبار وغيرها الموجودة في جو المنزل والتي يمكن أن يستنشقها سكان المنزل. ويعدّ الاشعاع المستنشق أكثر خطراً على الصحة من الاشعاع الخارجي . ولا يعتبر الرادون مشكلة كبيرة في البيوت التي يشكل الطوب (Brick) أو الاسمنت ( Concrete ) جزءًا كبيراً من بنائها ، ولكنه في حالة وجود الكثير من بناء الاسمنت أو الطوب مع عدم توافر التهوية الكافية فإن مستوى الإشعاع يزداد في هذه البيوت عن المستوى العادي بثلاث مرات بفعل اضمحلال اليورانيوم الموجود في مواد البناء هذه .

أما أول أكسيد الكربون فإنه يتكون أساساً كنتيجة لحرق أخشاب الوقود في المنزل ــ لأغراض التدفئة والاستعمالات الأخرى ــ وكذلك من المدافىء خصوصاً في حالة عدم وجود تهوية كافية .

الدقائق العالقة هي ألياف أسبستية ( Asbestos fibers ) بشكل أساسي . ويستعمل الاسبست كثيراً في البيوت والمدارس كمادة عازلة، كذلك في البناء . ولقد تم التعرف منذ سنوات إلى أخطار عديدة لها علاقة بالأسبست كالأمراض التنفسية وسرطان الرئة .

بالنسبة للمواد العضوية فإن هناك العديد منها ذات علاقة بموضوع التلوث داخل المنازل وأكثرها خطراً هو الفورمالدهايد ( Formaldehyde ) الذي يؤدي إلى تدميع العيون ( Watery eyes ) وتهيج الأنف والحلق والرئة عند تركيز يقل عن ( 1 PPm ) حيث ان ( $1\ PPm = 1.15\ mg / m^3$ ) .

# ٨ ـ ٣

# التحكم في تلوث الهواء وضبطه

# ( Air pollution control )

## ٨ ـ ٣ ـ ١ التحكم في الدقائق الصلبة العالقة :

إن مصادر التلوث الرئيسة هي مختلف أنواع المركبات ومحطات حرق الفحم الحجري . والملوثات الرئيسة التي يمكن إزالتها أو التخلص منهـا بشكل فعّـال هي الدقائق العالقة وغاز ثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) .

هناك عدة طرق مستعملة للتخلص من الدقائق العالقة الموجودة في الغـازات العـادمة التي تنفثهـا المحطات والمصانـع، ويقاس أداء أي نظـام إزالة بـواسطة مـا يسمى كفاءة التجميـع ( Collection efficiency ) لهـذا النظام والتي تُعـرّف كالآتي :

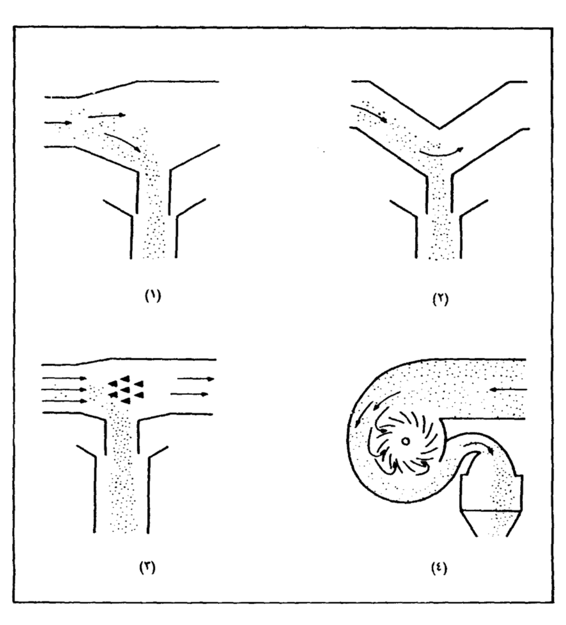
$$C\,E = \frac{\text{كتلة الغبار المزال}}{\text{كتلة الغبار الموجود}} \qquad (٨ ـ ٢)$$

كفاءة التجميـع

وتتراوح قيمة هذه الكفاءة من ٥٠ ٪ لبعض الأنظمة الميكانيكية البسيطة إلى ٩٩ ٪ للمرسب الكهروساكن ( Electrostatic precipitator ) . الشكل ( ٨ ـ ٥ ) يبين بعض الأنظمة الميكانيكيـة النموذجيـة المستعملة في إزالـة الدقـائق العالقـة وهي :

١ ــ التقليل الفجائي من سرعة الغاز .

٢ ــ التغيير المفاجىء في اتجاه جريان الغاز .

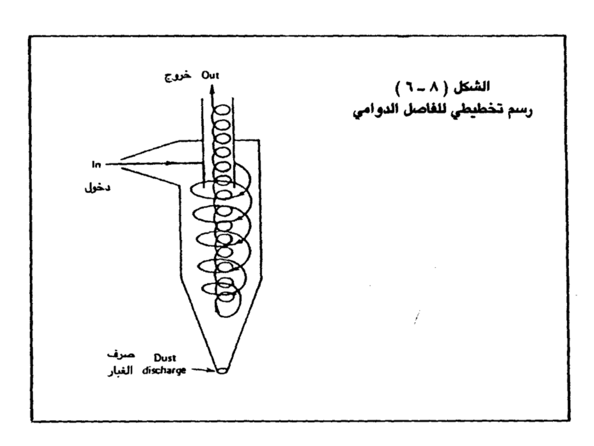



**الشكل ( ٨ ـ ٥ )**
**بعض أنظمة ترسيب الغبار الميكانيكية**

٣ ــ اصطدام تيار الغاز بعدد من المصدّات .

٤ ــ استعمال قوة الطرد المركزي، كما هو الحال في مروحة ريشة الرماد ( Cinder-Vane fan ) .

تسمى الأنظمة الثلاثة الأولى في الشكل ( ٨ ـ ٥ ) بمصائد الرماد



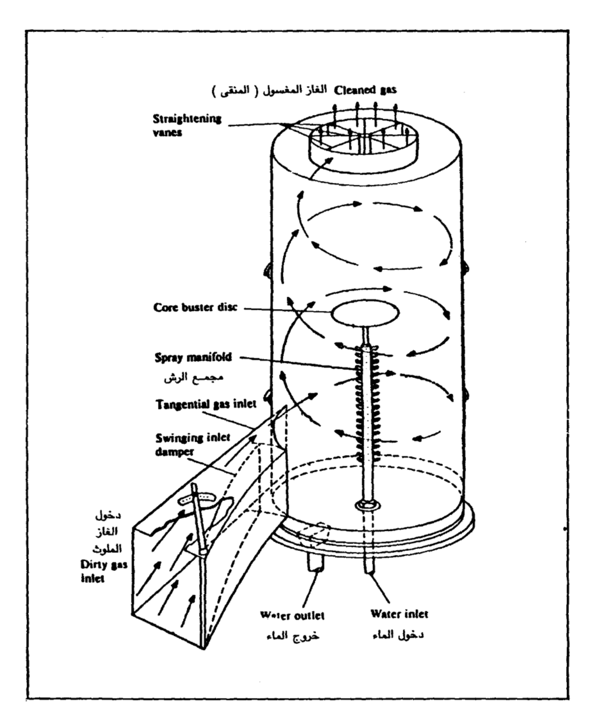

الشكل ( ٨ ـ ٦ )
رسم تخطيطي للفاصل الدوامي

( Cinder Catchers ) وتستعمل عادة في فرن ستوكر ( Stoker ) والأفران الدوامية الصغيرة التي يُحرق فيها الفحم المهشم عوضاً عن الفحم المسحوق فائق النعومة،وتتراوح كفاءات مصائد الرماد ومروحة ريشة الرماد المبينة في الشكل ( ٨ ـ ٥ ) ما بين ٥٠ ــ ٧٥ ٪.

وتستخدم الفاصلات الدوامية ( Cydone Separators ) ــ كالمبينة في الشكل ( ٨ ـ ٦ ) ــ للحصول على كفاءات تجميعية أعلى منها في حالة مصائد الرماد حيث تصل كفاءة الفاصل الدوامي إلى حوالى ٨٥ ٪ .

ويتلخص مبدأ عمل الفاصل الدوامي بتجميع الدقائق العالقة ( الغبار ) على جدران حجرة الفاصل بواسطة قوة الطرد المركزي ومن ثم ينهار هذا الرماد باتجاه قاع حجرة الفاصل حيث يتم تجميعه والتخلص منه . وتمتاز الفاصلات الدوامية بسهولة صيانتها وانخفاض تكاليف تشغيلها .

ويستخدم جهاز غسل الغاز ــ كالمبين في الشكل ( ٨ ـ ٧ ) ــ لإزالة الدقائق العالقة من الغازات المتولدة في العمليات الكيميائية المختلفة وفي صناعة طحن الحبوب ، ولا يستخدم ــ في العادة ــ لإزالة الرماد من الغازات العادمة .




**الشكل ( ٨ ـ ٧ )**
**جهاز غسل الغاز**

وبعض مشاكل هذا الجهاز هي أن الغاز يبرد كثيراً خلال عملية الغسل مما يتطلب إعادة تسخينه قبل إعادته للمدخنة، ومشكلة انخفاض ضغط الغاز خلال مروره بالجهاز بالإضافة إلى مشكلة تلوث الماء بحامضي الكبريتوز ( Sulfurous acid )

والكبـريتيك ( Sulfuric acid ) ــ والتي تسبب مشـاكل التـآكل ــ إذا كـان الغاز يحتـوي على أكاسيـد الكبريت . وتبلـغ كفـاءة التجميـع ( الغسل ) لهـذا الجهـاز حوالي ٩٠ ٪ .

وهنـاك المرسب الكهـروساكن ( Electrostatic precipitator ) المستعمـل لإزالة الدقائق العالقة ( الغاز ) من الغازات العادمة، كما هو مبين في الشكل أدناه .

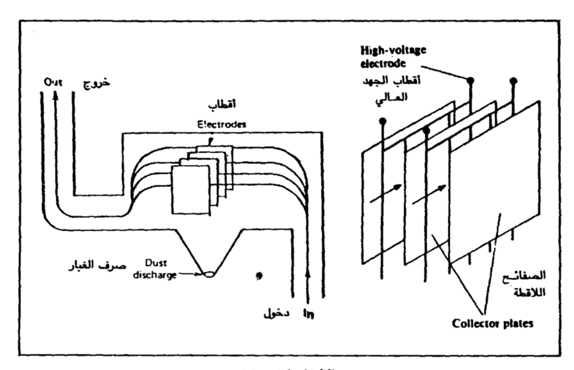
في هذا المرسب ، تـوضـع أسلاك ذات شحنـات عاليـة جداً ــ ٣٠٠٠٠ ــ ٦٠٠٠٠ فـولـت ــ فـي مجـرى الـغـاز الملـوث بيـن صفيحتيـن مـؤرضتيـن ( Grounded plates ) حيث تُشحن الـدقائق بشحنـة سالبـة خلال مـرورها عبـر الأسـلاك ومن ثم تنجذب بـاتجـاه الصفـائـح المؤرضـة التي يتم إزالـة الـدقـائق المترسبة عليها بواسطة طَرقها بقطعة من الفولاذ التي يتم رفعها وإسقاطها بواسطة مغناطيس كهربائي بين حين وآخر ، ويتم جمـع الغبار المترسب بواسطة أحـواض خاصة موضوعة تحت الصفائـح .

ويجب أخذ الحيطة عند تشغيل هذا المرسب من احتمال دخول شحنـات من الغازات غير المحترقة إليه ، وفي حالة دخولها يجب إيقاف المرسب فوراً عن العمل ( قطـع التيار الكهربائي عنه ) لأنها تسبب حدوث شرارات كهربائية بين الأسـلاك والصفـائـح قد تؤدي إلى حـدوث انفجـار في المـرسب . الشكـل ( ٨ ـ ٨ ) يبين رسماً تخطيطياً للمرسب الكهروساكن .

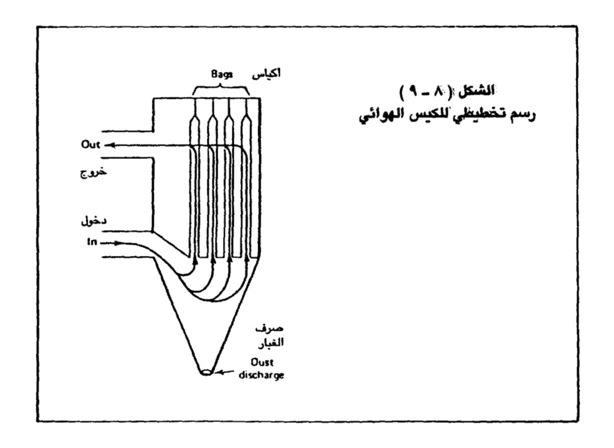
في حين أن المرسب الكهروستاتيكي شائـع الاستعمـال في محطات التـوليد ولـه كفاءة تجميـع تصل إلى ٩٩٪، إلا أنـه لا يعمل بشكـل جيد عنـد وجود رمـاد متطاير ذي مقاومة كهربائية مرتفعـة كما هـو الحال في الـرماد المتطـاير عنـد حرق الفحم الحجري ذي المحتوى المنخفض من الكبريت . وإحدى الطـرق المستخدمـة لحل هذه المشكلة هي بإضافة غـاز ثالث أكسيـد الكبريت ( $SO_3$ ) إلى الغـازات العادمة لزيادة الموصلية الحرارية للرماد المتطاير .

ومن الطرق المستخدمة في إزالة الدقائق العالقة طريقة الترشيـح باستعمال الأكياس الهوائية ( Air - bag ) ــ كالمبين في الشكل ( ٨ ـ ٩ ) ــ .

وتستخـدم هذه الطـريقـة بشكـل واسـع في مصـانـع الاسمنت ومصـانـع المنتجات الصيدلانية . ويتم تنظيف الأكياس الهوائية بواسطة تمرير الهواء باتجاه




الشكل ( ٨ ـ ٨ )
رسم تخطيطي للمرسب الكهروساكن




الشكل ( ٨ ـ ٩ )
رسم تخطيطي للكيس الهوائي

معاكس عبر هذه الأكياس أو بواسطة طرقها أو هزها بطرق أتوماتيكية . وتعتبر الأكياس الهوائية من الأنظمة ذات الكفاءة العالية لغاية استخلاص دقائق ذات أقطار صغيرة تصل إلى ٠,٣ ميكرومتر . ومن سيئات هذه الأكياس أنها ذات تكاليف صيانة وتشغيل مرتفعة .

## ٨ ـ ٣ ـ ٢ التحكم في الملوثات الغازية :

تعتبر أكاسيد الكبريت ( $SO_x$ ) ــ خصوصاً ثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) ــ من الملوثات الأساسية للجو . وتتولد معظم هذه الأكاسيد من محطات توليد الطاقة الكهربائية التي تعمل بوقود المستحاثات . إحدى الطرق المستخدمة لتخفيف نسبة هذه الملوثات في الجو هي بحرق الوقود ذي المحتوى الكبريتي المنخفض خصوصاً الفحم الحجري الذي يحتوي على أكبر النسب من الكبريت . وفي بعض الحالات فإنه بالإمكان إزالة الكبريت من الوقود قبل حرقه كما هو الحال في حرق الوقود الزيتي ( Fuel-oil ) . ولكون عملية إزالة الكبريت ( Desulfurization ) عملية مكلفة فإنها تستخدم على نطاق ضيق .

هناك طريقتان أساسيتان للتخلص من غاز ثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ):

١ ــ أنظمة الاسترجاع أو التجديد ( Recovery or regenerative systems ) في هذه الأنظمة ، فإن المادة المتفاعلة المستخدمة في امتصاص ثاني أكسيد الكبريت من الغازات الملوثة يتم استرجاعها لإعادة استخدامها ويكون الناتج النهائي للعملية إما حامض الكبريتيك ( $H_2SO_4$ ) أو عنصر الكبريت ( S ) .

٢ ــ الأنظمة غير المجددة ( Non generative system ) في هذه الأنظمة لا يتم استرجاع المواد المتفاعلة وتكون النواتج النهائية للعملية هي أملاح الكالسيوم والمغنيسيوم الكبريتية مثل ( $CaSO_3$ ) و ( $CaSO_4$ ) و ( $MgSO_3$ ) و ( $MgSO_4$ ) .

ترتبط عملية إنتاج أكاسيد النيتروجين الملوثة ( $NO_x$ ) ارتباطاً وثيقاً بدرجة حرارة الاحتراق وتزداد بازديادها ولهذا فإن واحدة من الطرق الأساسية للتقليل من هذه الملوثات هي بواسطة تخفيض درجة حرارة الاحتراق ومنع حدوث النقاط الحارة ( Hot-Spots ) في الأفران، كما يمكن الحد من تكون أكاسيد النيتروجين بتخفيض نسبة الهواء / الوقود أو بإعادة التدوير للغازات العادمة ( Exhaust-gas recirculation ) .

## ٨ ـ ٤

## التلوث الحراري : ( Thermal pollution )

إحدى مشاكل التلوث المصاحبة لتوليد الكهرباء في المحطات هي مشكلة تلوث الماء . وهناك ثلاث حالات لتلوث الماء في محطات توليد الطاقة :

١ ـ التلوث الكيميائي .
٢ ـ التلوث من المواد الصلبة .
٣ ـ التلوث الحراري .

وسنركز هنا على النوع الثالث من هذا التلوث المصاحب لطرد كميات كبيرة من الطاقة الحرارية إلى البيئة المجاورة للمحطة ـ خصوصاً الماء ـ ، حيث ان ضخ كميات كبيرة من الطاقة الحرارية للمياه الطبيعية المجاورة للمحطة يؤدي إلى حدوث ما يسمى بالتلوث الحراري .

إن إضافة الحرارة للماء يقلل من قدرته على حمل الغازات الذائبة فيه ومن ضمنها الأكسجين الذائب في الماء الذي يعتبر حيوياً وهاماً جداً للحياة المائية ، فإذا زادت درجة حرارة الماء عن ٣٥ °س فإن كمية الأكسجين الذائبة في الماء تصبح غير كافية للكائنات التي تعيش في هذه المياه، وعلى العكس من ذلك فإن الارتفاع المعقول في درجة حرارة المياه يعزز الحياة المائية ويساهم في نمو النباتات والأسماك بسرعة أكبر .

إن كمية الحرارة المطرودة من المحطة الحرارية إلى المياه ـ المياه المستعملة في التبريد ـ يعتمد على كفاءة هذه المحطة ، فإذا فرضنا أن الكفاءة

الحرارية لهذه المحطة هي ٤٠ ٪ فإن كمية الحرارة التي يتم ضخها للمياه تساوي ٦٠ ٪ من مجموع الطاقة المتولدة من حرق الوقود، أي أن الحرارة التي تساهم في التلوث الحراري تساوي ١,٥ مرة الحرارة التي يستفاد منها في توليد الطاقة المفيدة ( الكهربائية ) .

# ٨ ـ ٥

# التلوث الناتـج عن النفايات الصلبة :

# ( Solid-Waste pollution )

إن المحطات التي تستخدم الفحم الحجـري كوقـود تنتـج كميات كبيـرة من النفـايات الصلبـة على شكل رمـاد . فمحطة حـراريـة قـدرتهـا ٥٠٠ ميغـاواط من الكهـرباء ــ وتعمـل بالفحم الحجـري نسبة الـرماد فيـه ١٠ ٪ ــ تنتـج كمية من الرماد مقدارها ٢٠ طناً كل ساعة أو ما يعادل ١٦٥٠٠٠ طـن من الرمـاد سنوياً . بعض الرماد يمكن إضافته للتربة ، أما الرمـاد المتطايـر ( Flaysh ) فهو حامضي ويمكن استخدامه في تصنيـع الاسمنت والطوب .

وإذا كـانت نفس المحطة تستخـدم الحجـر الكلسي للتخلص من غـاز ثـاني أكسيـد الكبريت فـإن ذلك يؤدي إلى إنتـاج كميات كبيـرة من أمـلاح الكـالسيـوم والمغنيسيوم ، فإذا كـانت نسبة الكبـريت في الفحم هي ٢,٧٢ ٪ فإن كميـة ملـح الكالسيوم المنتجة تساوي ١٥ ٪ طن في السـاعة أو مـا يعادل ١٢٠٠٠٠ طـن في السنة بفرض أن ٢ ٪ من الكبريت يتحول إلى ملـح الكالسيوم .

إن أخطر أنواع التلـوث من المواد الصلبـة هو التلـوث الناتـج عن مخلفـات المفاعلات النووية الانشطارية حيث أن هذه المخلفات ذات نشاط إشعاعي عـالٍ ، وبسبب هذه الكميات الكبيرة من الإشعاع المنبعثة من هذه النفايات النـووية فـإنه من الضروري جداً عزل هذه المخلفـات عن المحيط الحيوي ( Biosphere ) لمـدة لا تقـل عن ألف ( ١٠٠٠ ) عام حتى يصبـح نشـاطها الإشعاعي مساوياً للنشـاط الإشعاعي لليورانيوم الخام .

وهناك عدة مقتـرحات أو مشـاريـع للتخلص من النفايـات النوويـة ، من هذه

المشاريـع تثبيت هذه النفايات في زجاج سيلكات البورون ( Borosilicate glass ) ومن ثم تخزين هذا الزجاج في كبسولات محكمة الإغلاق وتخزين هـذه الكبسولات بعـد ذلك في منـاجم أملاح عميقـة أو آبار محفـورة في أرضية المحيط المستقـرة ( Stable ocean floor ).

● ● ●

# ملحق رقم (١)

## زاوية الارتفاع ( $\beta_1$ ) وزاوية السمت ( $\alpha_1$ ) وشدة الإشعاع الشمسي الكلي عند اوقات مختلفة من اليوم وعلى مدار اشهر السنة ، عند خط عرض ٤٠ شمالاً

(For 40 degrees North latitude; 1.0 clearness factor; 0% ground reflectance)

| | Solar time | | Solar position | | Total solar insolation, W/m²† | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Date | A.M. | P.M. | Altitude $\beta_1$ | Azimuth $\alpha_1$ | Direct normal | Horizontal | South vertical |
| Jan 21 | 8 | 4 | 8.1 | 55.3 | 448 | 88 | 265 |
| | 9 | 3 | 16.8 | 44.0 | 753 | 262 | 539 |
| | 10 | 2 | 23.8 | 30.9 | 864 | 400 | 703 |
| | 11 | 1 | 28.4 | 16.0 | 911 | 485 | 797 |
| | 12 | | 30.0 | 0.0 | 927 | 517 | 829 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 6878 | 2988 | 5440 |
| Feb 21 | 7 | 5 | 4.8 | 72.7 | 217 | 32 | 69 |
| | 8 | 4 | 15.4 | 62.2 | 706 | 230 | 337 |
| | 9 | 3 | 25.0 | 50.2 | 863 | 416 | 526 |
| | 10 | 2 | 32.8 | 35.9 | 930 | 561 | 662 |
| | 11 | 1 | 38.1 | 18.9 | 961 | 649 | 744 |
| | 12 | | 40.0 | 0.0 | 971 | 681 | 772 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 8321 | 4457 | 5453 |
| Mar 21 | 7 | 5 | 11.4 | 80.2 | 539 | 145 | 110 |
| | 8 | 4 | 22.5 | 69.6 | 788 | 359 | 281 |
| | 9 | 3 | 32.8 | 57.3 | 889 | 545 | 435 |
| | 10 | 2 | 41.6 | 41.9 | 936 | 687 | 555 |
| | 11 | 1 | 47.7 | 22.6 | 961 | 779 | 630 |
| | 12 | | 50.0 | 0.0 | 968 | 810 | 656 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 9191 | 5838 | 4678 |

† 1 W/m² = 0.3173 Btu/h ft².

[ يتبــع ]

(Solar position and irradiation values for 40 degrees North latitude)

| Date | Solar time A.M. | Solar time P.M. | Solar position Altitude $\beta_1$ | Solar position Azimuth $\alpha_1$ | Total solar insolation, W/m²† Direct normal | Horizontal | South vertical |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Apr 21 | 6 | 6 | 7.4 | 98.9 | 281 | 63 | 13 |
| | 7 | 5 | 18.9 | 89.5 | 649 | 274 | 38 |
| | 8 | 4 | 30.3 | 79.3 | 794 | 479 | 167 |
| | 9 | 3 | 41.3 | 67.2 | 864 | 652 | 293 |
| | 10 | 2 | 51.2 | 51.4 | 901 | 788 | 397 |
| | 11 | 1 | 58.7 | 29.3 | 920 | 873 | 463 |
| | 12 | | 61.6 | 0.0 | 924 | 905 | 485 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 9746 | 7168 | 3221 |
| May 21 | 5 | 7 | 1.9 | 114.7 | 3 | 0 | 0 |
| | 6 | 6 | 12.7 | 105.6 | 454 | 154 | 28 |
| | 7 | 5 | 24.0 | 96.6 | 681 | 359 | 41 |
| | 8 | 4 | 35.4 | 87.2 | 788 | 552 | 79 |
| | 9 | 3 | 46.8 | 76.0 | 842 | 716 | 189 |
| | 10 | 2 | 57.5 | 60.9 | 873 | 842 | 280 |
| | 11 | 1 | 66.2 | 37.1 | 892 | 924 | 340 |
| | 12 | | 70.0 | 0.0 | 895 | 949 | 359 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 9960 | 8044 | 2282 |
| June 21 | 5 | 7 | 4.2 | 117.3 | 69 | 13 | 3 |
| | 6 | 6 | 14.8 | 108.4 | 489 | 189 | 32 |
| | 7 | 5 | 26.0 | 99.7 | 681 | 388 | 44 |
| | 8 | 4 | 37.4 | 90.7 | 775 | 574 | 50 |
| | 9 | 3 | 48.8 | 80.2 | 829 | 734 | 148 |
| | 10 | 2 | 59.8 | 65.8 | 857 | 857 | 233 |
| | 11 | 1 | 69.2 | 41.9 | 873 | 933 | 290 |
| | 12 | | 73.5 | 0.0 | 879 | 958 | 309 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 10,023 | 8346 | 1923 |
| July 21 | 5 | 7 | 2.3 | 115.2 | 6 | 0 | 0 |
| | 6 | 6 | 13.1 | 106.1 | 435 | 158 | 28 |
| | 7 | 5 | 24.3 | 97.2 | 656 | 359 | 44 |
| | 8 | 4 | 35.8 | 87.8 | 760 | 548 | 76 |
| | 9 | 3 | 47.2 | 76.7 | 816 | 709 | 183 |
| | 10 | 2 | 57.9 | 61.7 | 848 | 835 | 271 |
| | 11 | 1 | 66.7 | 37.9 | 867 | 914 | 328 |
| | 12 | | 70.6 | 0.0 | 870 | 939 | 350 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 9651 | 7987 | 2213 |

† 1 W/m² = 0.3173 Btu/h·ft².

[ يتبع ]

(Solar position and irradiation values for 40 degrees North latitude)

| Date | Solar time A.M. | Solar time P.M. | Solar position Altitude $\beta_1$ | Solar position Azimuth $\alpha_1$ | Total solar insolation, W/m²† Direct normal | Horizontal | South vertical |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Aug 21 | 6 | 6 | 7.9 | 99.5 | 255 | 66 | 16 |
| | 7 | 5 | 19.3 | 90.0 | 602 | 274 | 38 |
| | 8 | 4 | 30.7 | 79.9 | 747 | 473 | 158 |
| | 9 | 3 | 41.8 | 67.9 | 820 | 646 | 281 |
| | 10 | 2 | 51.7 | 52.1 | 857 | 775 | 378 |
| | 11 | 1 | 59.3 | 29.7 | 876 | 860 | 441 |
| | 12 | | 62.3 | 0.0 | 883 | 889 | 463 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 9191 | 7073 | 3083 |
| Sep 21 | 7 | 5 | 11.4 | 80.2 | 469 | 136 | 101 |
| | 8 | 4 | 22.5 | 69.6 | 725 | 344 | 265 |
| | 9 | 3 | 32.8 | 57.3 | 829 | 526 | 416 |
| | 10 | 2 | 41.6 | 41.9 | 883 | 665 | 530 |
| | 11 | 1 | 47.7 | 22.6 | 905 | 753 | 605 |
| | 12 | | 50.0 | 0.0 | 914 | 785 | 630 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 8536 | 5636 | 4463 |
| Oct 21 | 7 | 5 | 4.5 | 72.3 | 151 | 22 | 50 |
| | 8 | 4 | 15.0 | 61.9 | 643 | 214 | 315 |
| | 9 | 3 | 24.5 | 49.8 | 810 | 397 | 504 |
| | 10 | 2 | 32.4 | 35.6 | 882 | 536 | 640 |
| | 11 | 1 | 37.6 | 18.7 | 917 | 627 | 722 |
| | 12 | | 39.5 | 0.0 | 927 | 656 | 750 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 7735 | 4249 | 5213 |
| Nov 21 | 8 | 4 | 8.2 | 55.4 | 429 | 88 | 255 |
| | 9 | 3 | 17.0 | 44.1 | 731 | 258 | 526 |
| | 10 | 2 | 24.0 | 31.0 | 845 | 397 | 690 |
| | 11 | 1 | 28.6 | 16.1 | 892 | 482 | 782 |
| | 12 | | 30.2 | 0.0 | 908 | 514 | 813 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 6707 | 2969 | 5314 |
| Dec 21 | 8 | 4 | 5.5 | 53.0 | 281 | 44 | 177 |
| | 9 | 3 | 14.0 | 41.9 | 684 | 205 | 514 |
| | 10 | 2 | 20.7 | 29.4 | 823 | 337 | 697 |
| | 11 | 1 | 25.0 | 15.2 | 883 | 422 | 794 |
| | 12 | | 26.6 | 0.0 | 898 | 451 | 829 |
| | Surface daily totals, W·h/m² | | | | 6235 | 2465 | 5188 |

• • •

# ملحق رقم (٢)

## المركبة العمودية المباشرة ( I d n )
## عند أوقات مختلفة وخطوط عرض مختلفة

| Date | Degrees latitude | Direct normal insolation, $W \cdot h/m^2$ |
|---|---|---|
| Jan 21 $\delta = -20°$ | 24 | 8718 |
| | 32 | 7748 |
| | 40 | 6878 |
| | 48 | 5390 |
| | 56 | 3549 |
| | 64 | 965 |
| Feb 21 $\delta = -10.6°$ | 24 | 9569 |
| | 32 | 9053 |
| | 40 | 8321 |
| | 48 | 7344 |
| | 56 | 6260 |
| | 64 | 4514 |
| Mar 21 $\delta = 0.0°$ | 24 | 9702 |
| | 32 | 9494 |
| | 40 | 9191 |
| | 48 | 8763 |
| | 56 | 8151 |
| | 64 | 7237 |
| July 21 $\delta = +20.5°$ | 24 | 9242 |
| | 32 | 9494 |
| | 40 | 9651 |
| | 48 | 9954 |
| | 56 | 10212 |
| | 64 | 10628 |
| Apr 21 $\delta = +11.9°$ | 24 | 9569 |
| | 32 | 9696 |
| | 40 | 9746 |
| | 48 | 9696 |
| | 56 | 9532 |
| | 64 | 9399 |
| May 21 $\delta = +20.3°$ | 24 | 9557 |
| | 32 | 9809 |
| | 40 | 9960 |
| | 48 | 10257 |
| | 56 | 10528 |
| | 64 | 10937 |
| June 21 $\delta = +23.45°$ | 24 | 9437 |
| | 32 | 9721 |
| | 40 | 10023 |
| | 48 | 10439 |
| | 56 | 10837 |
| | 64 | 11505 |
| Oct 21 $\delta = -10.7°$ | 24 | 9040 |
| | 32 | 8498 |
| | 40 | 7735 |
| | 48 | 6789 |
| | 56 | 5686 |
| | 64 | 3902 |

[ يتبـع ]

| Date | Degrees latitude | Direct normal insolation, $W \cdot h/m^2$ | Date | Degrees latitude | Direct normal insolation, $W \cdot h/m^2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Aug 21 | 24 | 9027 | Nov 21 | 24 | 8529 |
| $\delta = +12.1°$ | 32 | 9147 | $\delta = -19.9°$ | 32 | 7584 |
| | 40 | 9191 | | 40 | 6707 |
| | 48 | 9134 | | 48 | 5257 |
| | 56 | 8983 | | 56 | 3448 |
| | 64 | 8851 | | 64 | 952 |
| Sep 21 | 24 | 9071 | Dec 21 | 24 | 8271 |
| $\delta = 0.0°$ | 32 | 8851 | $\delta = -23.45°$ | 32 | 7401 |
| | 40 | 8536 | | 40 | 6235 |
| | 48 | 8094 | | 48 | 4551 |
| | 56 | 7464 | | 56 | 2357 |
| | 64 | 6537 | | 64 | 76 |

● ● ●

عاهد الخطيب

# مبادىء تحويل الطاقة

شروق للنشر والتوزيع
- الأردن

التوزيع : المركز العربي لتوزيع المطبوعات
بيروت - لبنان